



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

## NÁVRH A OPTIMALIZACE LABORATORNÍCH MODELŮ VVN

DESIGN AND OPTIMIZATION OF LABORATORY HV MODELS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

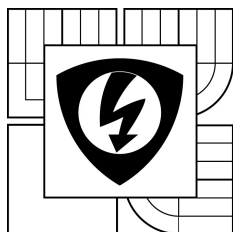
Zbyněk Kočí

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Varmuža

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Sílnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

**Student:** Zbyněk Kočí

**Ročník:** 3

**ID:** 155176

**Akademický rok:** 2015/16

**NÁZEV TÉMATU:**

## Návrh a optimalizace laboratorních modelů VVN

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Provedte rešerši běžně používaných typů a uspořádání venkovních a kabelových vedení.
2. Proměřte stávající laboratorní modely, porovnejte jejich parametry s reálnými parametry vedení, navrhnete a realizujete jejich korekce.
3. Pro vybraný typ a délku vedení vypočítejte jeho parametry a navrhnete komponenty pro vytvoření modelu.
4. Sestavte model a vypracujte vzorový protokol.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 13. 6. 2016

**Termín odevzdání:** 15. 8. 2016

**Vedoucí práce:** Ing. Jan Varmuža

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

KOČÍ, Z. *Návrh a optimalizace laboratorních modelů VVN*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 69 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Varmuža.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
Ústav elektroenergetiky**

**Bakalářská práce**

# **NÁVRH A OPTIMALIZACE LABORATORNÍCH MODELŮ VVN**

**Zbyněk Kočí**

**vedoucí: Ing. Jan Varmuža**

**Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2016**

**Brno**



**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

**Faculty of Electrical Engineering and Communication  
Department of Electrical Power Engineering**

**Bachelor's Thesis**

# **Design and optimization of laboratory HV models**

**by**

**Zbyněk Kočí**

**Supervisor: Ing. Jan Varmuža**

**Brno University of Technology, 2016**

**Brno**

## ABSTRAKT

Bakalářská práce se zaměřuje na provozování distribuční soustavy v české republice a používání nových typů kabelů ve světě. Popisuje vlastnosti, rozdělení a použití venkovního vedení a kabelového vedení. Práce se dále zabývá rozdělením a řízením stejnosměrných sítí jejich výhodami a nevýhodami. U supravodivých kabelů se zabývá jejich vývojem, výhodami a nevýhodami. Popisuje jejich používání a využití do budoucna. Dále také popisuje parametry ovlivňující vlastnosti lan a kabelů střídavého a stejnosměrného vedení a způsoby zmírnění negativních účinků na lana a na okolní prostředí. Práce se zabývá měřením a počítáním laboratorních modelů pro jejich optimalizování. Nakonec je v práci popsán návrh nového laboratorního modelu pro měření a uvedení součástek, které jsou potřeba pro optimalizaci modelů a výrobu nového modelu.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** Distribuční soustava; venkovní vedení; kabelové vedení; stejnosměrné vedení; supravodivé vedení; velmi vysoké napětí; vysoké napětí; nízké napětí, model vedení

## **ABSTRACT**

Bachelor's thesis is focuses on the operation of the distribution system in the Czech Republic and the use of new types of cables in the world. It describes the characteristics, division and use of overhead lines and cable lines. This work also deals the division and control DC networks, their advantages and disadvantages. In superconducting cables is engaged in their development, advantages and disadvantages. Describes their application and use in the future. It also describes the parameters affecting the properties of the ropes and the cables of the AC and DC wiring and ways to mitigate the negative effects on the ropes and on the surrounding environment. Work deals with measurement and counting of the laboratory models for their optimization. Finally, the work describes a proposal of new laboratory model for the measurement and stating components, which are needed for optimization models and the production of a new model.

**KEY WORDS:** Distribution system; overhead lines; cable lines; DC lines; superconducting cables; very high voltage; high voltage; low voltage; model of line

## OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK .....	12
SEZNAM SYMBOLŮ.....	13
1. ÚVOD.....	14
2. PARAMETRY SÍTĚ.....	15
2.1 VENKOVNÍ VEDENÍ.....	15
2.1.1 REZISTANCE VODIČŮ .....	15
2.1.2 INDUKČNOST VODIČŮ .....	16
2.1.3 KAPACITA VEDENÍ .....	18
2.1.4 SVAZKOVÉ VODIČE .....	18
2.2 KABELOVÉ VEDENÍ .....	18
3. ELEKTRICKÉ VEDENÍ .....	19
3.1 MATERIÁL VODIČŮ .....	19
3.1.1 MĚDĚNÉ VODIČE.....	19
3.1.2 HLINÍKOVÉ VODIČE.....	19
3.1.3 BRONZOVÉ VODIČE.....	19
3.1.4 ŽELEZNÉ VODIČE .....	20
3.1.5 SLITINOVÉ VODIČE.....	20
3.2 VENKOVNÍ VEDENÍ.....	20
3.2.1 KONSTRUKCE VENKOVNÍCH VODIČŮ.....	20
3.2.2 DĚLENÍ PODLE HLADINY NAPĚTÍ .....	22
3.2.3 STOŽÁRY VENKOVNÍHO VEDENÍ.....	22
3.3 KABELOVÉ VEDENÍ .....	26
3.3.1 KONSTRUKCE KABELOVÝCH VODIČŮ .....	26
3.3.2 DĚLENÍ PODLE HLADINY NAPĚTÍ .....	30
3.3.3 ULOŽENÍ KABELOVÉHO VEDENÍ .....	32
4. STEJNOSMĚRNÉ VEDENÍ.....	34
4.1 HVDC VEDENÍ.....	34
4.2 KABELY.....	34
4.2.1 NADZEMNÍ VEDENÍ .....	35
4.2.2 PODMOŘSKÉ A PODZEMNÍ KABELY .....	35
4.3 KONFIGURACE HVDC VEDENÍ .....	35
4.3.1 MONOPOLÁRNÍ .....	35
4.3.2 BIPOLÁRNÍ .....	35
4.3.3 SYSTÉM BACK-TO-BACK .....	36
4.4 ZÁKLADNÍ PRINCIP ŘÍZENÍ.....	36
4.4.1 ZMĚNA ENERGIE MEZI STRÍDAČEM A USMĚRŇOVAČEM .....	36
4.5 ZÁKLADNÍ ŘÍDICÍ SYSTÉM HVDC .....	37
4.5.1 ŘÍDICÍ SYSTÉM SPOUŠTĚNÍ MĚNIČŮ (CFC) .....	37



---

4.5.2 SPOUŠTĚNÍ KONTROLY OPERAČNÍCH REŽIMŮ MĚNIČE .....	39
<b>4.6 DALŠÍ ŘÍDÍCÍ FUNKCE HVDC.....</b>	<b>39</b>
4.6.1 VÝPOČET REFERENČNÍHO NAPĚTÍ A ÚHLU A (VARC) .....	39
4.6.2 ŘÍDÍCÍ ZAŘÍZENÍ PRO PŘEPÍNÁNÍ ODBOČEK (TCC) .....	40
4.6.3 ŘÍZENÍ JALOVÉHO VÝKONU (RPC) .....	41
<b>4.7 POUŽITÍ KABELŮ .....</b>	<b>42</b>
4.7.1 NEJVÝKONNĚJŠÍ VEDENÍ .....	42
4.7.2 NEJDELŠÍ VEDENÍ .....	43
4.7.3 NEJDELŠÍ PODMOŘSKÉ VEDENÍ .....	44
4.7.4 NEJVÝŠE POLOŽENÉ VEDENÍ .....	45
<b>5. SUPRAVODIVÉ VEDENÍ.....</b>	<b>46</b>
5.1 VÝZKUM .....	46
5.2 SUPRAVODIVOST PŘI VYSOKÉM TLAKU.....	46
5.3 VÝHODY SUPRAVODIVÉHO VEDENÍ .....	47
5.4 KABELY.....	48
5.4.1 YBCO .....	48
5.4.2 BSCCO .....	48
5.4.3 MGB <sub>2</sub> .....	49
5.5 VYUŽITÍ SUPRAVODIVOSTI .....	49
5.5.1 NEJDELŠÍ KABEL .....	49
5.5.2 NEJVÝKONNĚJŠÍ KABEL .....	50
5.5.3 MAGLEV .....	51
5.5.4 POTENCIÁLNÍ VYUŽITÍ .....	51
<b>6. LABORATORNÍ MODEL Y.....</b>	<b>52</b>
6.1 OPTIMALIZACE MODELŮ .....	52
6.2 NÁVRH MODELU .....	60
<b>7. ZÁVĚR.....</b>	<b>64</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>65</b>
<b>8. PŘÍLOHY .....</b>	<b>67</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Transpozice vedení [29]</i> .....	17
<i>Obr. 2-2 Spojka svazkového vedení</i> .....	18
<i>Obr. 3-1 Závěsný kabel</i> .....	21
<i>Obr. 3-2 Stožár 400 kV typu delta</i> .....	24
<i>Obr. 3-3 Betonový sloup 22 kV</i> .....	25
<i>Obr. 3-4 Značení kabelů</i> .....	26
<i>Obr. 3-5 CYKY [6]</i> .....	28
<i>Obr. 3-6 NYCWY [6]</i> .....	28
<i>Obr. 3-7 CXKCE [6]</i> .....	29
<i>Obr. 3-8 CVXEKVCE [6]</i> .....	29
<i>Obr. 3-9 CGSU [6]</i> .....	30
<i>Obr. 3-10 Kabel 110 kV [6]</i> .....	30
<i>Obr. 4-1 Stožár HVDC vedení [19]</i> .....	34
<i>Obr. 4-2 Jednoduché schéma pro monopolární HVDC přenos [14]</i> .....	36
<i>Obr. 4-3 Schéma 12- pulzního usměrňovače [14]</i> .....	37
<i>Obr. 4-4 Řídicí systém [14]</i> .....	37
<i>Obr. 4-5 Schéma řídicího systému s kontrolou spouštění [14]</i> .....	38
<i>Obr. 4-6 Přehled VARC [14]</i> .....	40
<i>Obr. 4-7 Místo nejvýkonnějšího vedení v Číně [16]</i> .....	42
<i>Obr. 4-8 Rozvodna Jinping-Sunan [27]</i> .....	42
<i>Obr. 4-9 Místo nejdelšího vedení v Brazílii [17]</i> .....	43
<i>Obr. 4-10 Rozvodna Rio Madeira [17]</i> .....	43
<i>Obr. 4-11 Řez HVDC kabelem [28]</i> .....	44
<i>Obr. 4-12 Navinutý kabel na cívku [28]</i> .....	44
<i>Obr. 4-13 První stožár v Geermu [19]</i> .....	45
<i>Obr. 5-1 Struktura vodiče YBCO [23]</i> .....	48
<i>Obr. 5-2 Struktura vodiče BSCCO [23]</i> .....	48
<i>Obr. 5-3 Struktura vodiče <math>MgB_2</math> [23]</i> .....	49
<i>Obr. 5-4 Supravodivý kabel [12]</i> .....	49
<i>Obr. 5-5 Testování kabelu [24]</i> .....	50
<i>Obr. 5-6 Maglev [25]</i> .....	51
<i>Obr. 6-1 Schéma laboratorního modelu</i> .....	52

---

<i>Obr. 6-2 Schéma laboratorního modelu.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 6-3 Laboratorní model s přidaným rezistorem .....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 6-4 Graf V-A charakteristika cívky .....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 8-1 Schéma <math>\pi</math>-článku v zapojení naprázdno .....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 8-2 Schéma <math>\pi</math>-článku v zapojení nakrátko .....</i>	<i>67</i>

## SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 5-1 Kritické teploty supravodičů.....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 6-1 Tabulka naměřených modelových hodnot.....</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 6-2 Tabulka vypočtených reálných hodnot .....</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 6-3 Tabulka vypočtených přídavných odporů.....</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 6-4 Tabulka naměřených hodnot s přídavným odporem.....</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 6-5 Tabulka přepočtených hodnot s přídavným odporem.....</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 6-6 Tabulka impedance a admitance bez přídavného odporu .....</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 6-7 Tabulka impedance a admitance s přídavným odporem .....</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 6-8 Tabulka Blondelových konstant bez přídavného odporu.....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 6-9 Tabulka vypočtených Blondelových konstant .....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 6-10 Přídavné rezistory pro modely.....</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 6-11 Tabulka naměřených hodnot se skutečným rezistorem.....</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 6-12 Tabulka vypočtených hodnot se skutečným rezistorem.....</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 6-13 Tabulka Blondelových konstant se skutečným rezistorem .....</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 6-14 Parametry navrženého modelu .....</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 6-15 Součástky pro laboratorní model.....</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 6-16 Indukčnost cívky.....</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 6-17 Parametry modelu.....</i>	<i>62</i>
<i>Tab. 6-18 Přepočtené hodnoty .....</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 6-19 Blondelovy konstanty.....</i>	<i>63</i>

## SEZNAM SYMBOLŮ

<b>A, B, C, D</b>	blondelovy konstanty	$[-, \Omega, S, -]$
<b>A<sub>p</sub>, B<sub>p</sub>, C<sub>p</sub>, D<sub>p</sub></b>	blondelovy konstanty z měrných hodnot	$[-, \Omega, S, -]$
<b>B<sub>c</sub></b>	kapacitní susceptance	$[S]$
<b>B<sub>k</sub></b>	susceptance vedení na jednotku vzdálenosti	$[S/km]$
<b>C</b>	kapacita	$[F]$
<b>C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>,</b>	kapacita modelu	$[F]$
<b>C<sub>k</sub></b>	kapacita vedení na jednotku délky	$[F/km]$
<b>f</b>	frekvence	$[Hz]$
<b>I</b>	proud	$[A]$
<b>I<sub>0</sub></b>	proud naprázdno	$[A]$
<b>I<sub>10</sub></b>	skutečný vstupní proud naprázdno	$[A]$
<b>I<sub>k</sub></b>	proud nakrátko	$[A]$
<b>I<sub>1k</sub></b>	skutečný vstupní proud nakrátko	$[A]$
<b>I<sub>m</sub></b>	proud modelu	$[A]$
<b>L</b>	indukčnost	$[H]$
<b>L<sub>m</sub></b>	indukčnost modelu	$[H]$
<b>l</b>	vzdálenost	$[km]$
<b>m<sub>i</sub></b>	měřítka proudu	$[-]$
<b>m<sub>u</sub></b>	měřítka napětí	$[-]$
<b>m<sub>z</sub></b>	měřítka impedance	$[-]$
<b>P</b>	výkon	$[W]$
<b>P<sub>0</sub></b>	výkon naprázdno	$[W]$
<b>P<sub>10</sub></b>	skutečný výkon naprázdno	$[W]$
<b>P<sub>k</sub></b>	výkon nakrátko	$[W]$
<b>P<sub>1k</sub></b>	skutečný výkon nakrátko	$[W]$
<b>P<sub>z</sub></b>	příkon	$[W]$
<b>R</b>	rezistance	$[\Omega]$
<b>R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub></b>	naměřený odpor modelu	$[\Omega]$
<b>R<sub>k</sub></b>	rezistance vedení na jednotku vzdálenosti	$[\Omega/km]$
<b>R<sub>m</sub></b>	celkový odpor modelu	$[\Omega]$
<b>R<sub>p</sub></b>	přídavný odpor	$[\Omega]$
<b>U</b>	napětí	$[V]$
<b>U<sub>0</sub></b>	napětí naprázdno	$[V]$
<b>U<sub>10</sub></b>	skutečné vstupní napětí naprázdno	$[V]$
<b>U<sub>k</sub></b>	napětí nakrátko	$[V]$
<b>U<sub>1k</sub></b>	skutečné vstupní napětí nakrátko	$[V]$
<b>U<sub>m</sub></b>	napětí modelu	$[V]$
<b>X</b>	reaktance	$[\Omega]$
<b>X<sub>k</sub></b>	reaktance vedení na jednotku vzdálenosti	$[\Omega/km]$
<b>X<sub>m</sub></b>	reaktance modelu	$[\Omega]$
<b>Y</b>	příčná admitance	$[S]$
<b>Z</b>	podélná impedance	$[\Omega]$
<b>Z<sub>10</sub></b>	přepočtená impedance naprázdno	$[\Omega]$
<b>Z<sub>1k</sub></b>	přepočtená impedance nakrátko	$[\Omega]$
<b>Z<sub>m</sub></b>	impedance modelu	$[\Omega]$

# 1. ÚVOD

V roce 1882 postavil, Thomas Alva Edison v New Yorku, první elektrárnu na stejnosměrný proud na světě. Dynamo, na parní pohon, vyrábělo stejnosměrné napětí 110 V. Nevýhoda byla v tom, že se muselo stavět hodně elektráren a od každé elektrárny vedlo mnoho silných kabelů s nízkou přenosovou účinností. Kabely se navzájem křížovali na každém sloupu. Toto řešení bylo nepřehledné a nebezpečné. Také koně dostávali na ulici skrz kopyta elektrické rány. O lepším přenos elektrické energie se zasloužil Nikola Tesla, použitím střídavého proudu. Ten se dal používat na větší vzdálenosti, a tím se dalo přesunout elektrárny mimo město. Kabely mohly být až 6x tenčí, než u stejnosměrného proudu. První představení střídavého proudu bylo v roce 1893 na osvětlení náměstí v Chicagu. Tím si dostal Tesla na svou stranu mnoho příznivců. Rozhodnutí o používání střídavého proudu bylo v roce 1896, když byla zpuštěna vodní elektrárna na Niagarských vodopádech [1].

V česku se poprvé využívá elektrická energie v roce 1882 v Brně. Bylo použito na osvětlení v Mahenově divadle, za použití stejnosměrného proudu. Do konce 30. let 20. století bylo elektrickou energií napojeno 90% obyvatel. Největší změna nastala v roce 1995, kdy se Česká republika plně propojila se západní Evropou [7].

K distribuci elektrické energie používáme distribuční soustavu. Distribuční soustava slouží k přenosu elektrické energie od výrobce až po konečného uživatele. Spadají do ní všechny venkovní a kabelová vedení, transformátory napětí, úložná zařízení, stožáry, izolátory aj. Distribuční soustavu dělíme podle napětí do 3. kategorií:

- Velmi vysoké napětí 110 kV, pro přenos na velké vzdálenosti.
- Vysoké napětí 35 kV a 22 kV, pro přenos po obydlených oblastech a firmách.
- Nízké napětí 400 V, pro koncové uživatele.

S vývojem elektrických součástek a zařízení se opět vrací využívání stejnosměrného napětí. Používá se na velmi vysokém napětí a dokáže přenášet elektrickou energii na stovky až tisíce kilometrů. Vedení je převážně používáno na přenos elektrické energie od elektráren na obnovitelné zdroje. Díky stejnosměrnému napětí, elektrické vedení nemá takové rušící vlivy jako u střídavého napětí.

S výzkumem vlastností materiálů a experimentování s ním se objevilo využití supravodivých kabelů, které pracují při teplotě pod  $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Dalším vývojem materiálu se pracovní teplota, při které dochází k supravodivosti, zvýšila na  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Kabely v současnosti stále procházejí experimentální fází vývoje, než začnou být dostupné k běžnému využívání pro přenos elektrické energie.

## 2. PARAMETRY SÍTĚ

Každé vedení má určité parametry, mezi ty hlavní řadíme indukčnost  $L$ , rezistanci  $R$ , kapacitu  $C$  a konduktanci  $G$ . Když se řeší ustálený stav sítě o frekvenci 50 Hz, tak se zavádějí odvozené parametry, jako induktivní reaktance (2-1), kapacitní susceptance (2-2), podélná impedance (2-3) a příčná admitance (2-4) [2]. Parametry jsou závislé na vzdálenosti, a proto je zvykem jednotky přepočítávat na kilometry a přidávat ke značení spodní index  $k$ . Za provozu jsou ovlivňovány hlavně klimatickými podmínkami jako je námraza, vítr, déšť a teplo. Parametry jsou dále ovlivňovány materiálem, průřezem a izolací vodiče, druhem vodiče (samostatný drát, vícežilový drát atd.), způsobem zavěšení na stožárech venkovního vedení nebo způsobem uložení u kabelového vedení (vodorovně, svisle atd.). Dále na velikosti prohnutí a na vzdálenosti jednotlivých vodičů mezi jednotlivými fázemi a mezi fází a zemí [2].

$$X = 2\pi fL \quad (2-1)$$

$$B_c = 2\pi fC \quad (2-2)$$

$$Z = R + jX \quad (2-3)$$

$$Y = G + jB \quad (2-4)$$

### 2.1 Venkovní vedení

Venkovní vedení je nejpoužívanější zařízení pro přenos elektrické energie od elektráren ke spotřebitelům. S rostoucím požadavkem na přenesený výkon se musí upravovat parametry lan venkovního vedení, aby se zabránilo jakémukoli poškození.

#### 2.1.1 Rezistance vodičů

Je to reálná složka podélné impedance, která se určuje pomocí rezistivity, průřezu a délky vedení. Způsobuje ztráty činného výkonu a vzniká na ní úbytek napětí. Vliv na rezistenci má také materiál, teplota, průhyb lan, kroucení lan, spoje, skinefekt a aj [2].

##### 2.1.1.1 Materiál

Každý materiál má různou atomovou strukturu a tím i různě velký elektrický odpor. Velikost odporu závisí na materiálu vodiče a na jeho průřezu. Se snižující rezistivitou klesá odpor a se snižujícím průřezem odpor stoupá.

##### 2.1.1.2 Teplota

Proud procházející kovovým vodičem rozkmitává atomy, které potom narážejí do elektronů. To má za následek ohřívání vodiče a tím i zvýšení jeho odporu. U venkovního vedení se ztráty sníží zvýšením napětí nebo zvětšením průřezu vodiče. Proto se začaly vyvíjet supravodivé

kabely, které jsou chlazeny téměř na absolutní nulu a tím mají minimální elektrický odpor. U polovodičových materiálů to funguje naopak a se zvyšující teplotou odpor klesá.

### 2.1.1.3 Skinefekt

Při průchodu střídavého proudu vodičem, se zvětšuje jeho proudová hustota směrem k povrchu vodiče, a tím se zvyšuje jeho rezistance. Nerovnoměrnost rozložení proudu způsobuje kmitočet, proud, průřez a materiál vodiče. U stejnosměrného proudu se skinefekt neprojevuje. Při kmitočtu 50 Hz je skinefekt zanedbatelný [2].

### 2.1.1.4 Průhyb vodiče a spletení drátů

Působením tepla se venkovní vodič prohne a tím zvětší svojí velikost a rezistanci. U kabelového vedení se s průhybem nepočítá. Spletení vodiče z lan má za následek, že okrajové lanka mají větší délku než lano uprostřed. Lano má větší rezistanci než plný vodič stejného průřezu, délky a materiálu. Nárůst rezistance je u obou případů kolem 2%.

## 2.1.2 Indukčnost vodičů

Průchodem proudu ve vodiči vzniká magnetické pole, které působí na vodič. U vedení, které má více vodičů blízko u sebe, střídavé magnetické pole ovlivňuje všechny vodiče a indukuje v nich napětí. U souměrné trojfázové soustavy se vliv indukce může vyjádřit jen pro jednu fázi. U nesymetrických sítí se musí vliv vlastní a vzájemné indukce počítat pro každou fázi zvlášť.

### 2.1.2.1 Transpozice vedení

Žádné trojfázové vedení není mezi dvěma odběrnými body stejně dlouhé, kvůli kroucení a prohýbání lan, a proto na nich vzniká různá indukce. Ta zhoršuje kvalitu elektrické energie a snižuje účinnost motorů. Indukce se omezí tak, že se vodiče mezi sebou postupně vystřídají ve třetinách délky úseku a vystřídají všechny pozice na stožáru. Pro vn není nutná. U vvn (110 kV a 220 kV) se používá na vzdálenosti nad 100 km délky a u zvn (400 kV) vedení stačí na 300 km délky.





Obr. 2-1 Transpozice vedení [29]

### 2.1.2.2 Konduktance vedení

Je to reálná složka příčné admitance, která způsobuje ztrátu činného výkonu. Nezáleží na zatížení, ale hlavně na napětí a klimatických vlivech. Dělíme ji na ztráty korónou, které jsou častější a ztráty svodem [2].

#### Ztráty korónou

Při překročení kritického napětí, dochází u vodiče k prosakování proudu korónou do atmosféry. Při takovém napětí intenzita elektrického pole umožňuje ionizaci vzduchu. Je to málo viditelný modrofialový výboj a je doprovázen slyšitelnými výboji. Kritické napětí se nedá přesně určit, protože závisí na poloměru a vzdálenosti vodičů, hladkosti lana a hlavně na vlhkosti vzduchu. Povrch lana má vliv na počáteční stádium koróny. Drobné nečistoty se stávají ohnisky nestabilních výbojů. Koróna způsobuje na vvn vedení ztráty a ruší telekomunikační zařízení. Využívá se u elektrostatických odlučovačů, pro odlučování pevných a kapalných částic ze vzduchu [2], [3].

#### Ztráty svodem

Ztráty svodem jsou způsobeny znečištěním, poškozením izolátorů, deštěm nebo stářím a poškozením izolačního materiálu, který po překročení propouští proud. Vlivem znečištění životního prostředí, dochází k usazování nečistot na izolátorech a tím začne propouštět proud po svém povrchu. Působením střídavého elektrického pole, vznikají dielektrické ztráty, které se projevují jako nedokonalá izolace. Vypočítání svodové konduktance je složité, protože je ovlivněna náhodnými okolnostmi. Většinou se počítá pomocí změřených ztrát naprázdno, protože jsou podobné.

### 2.1.3 Kapacita vedení

Vyjadřuje zpětný vliv elektrického pole způsobující napětí mezi vodiči v prostoru vedení na dané vedení. Proměnné elektrické pole vytváří magnetické pole, které indukuje proud ve všech vodičích. Pro určení kapacity jednovodičového vedení mezi vodičem a zemí, se používá metoda zrcadlení. Jde o fiktivní obvod, ve kterém je zem nahrazena vodičem, který je umístěný v zemi ve stejné hloubce, jako je stejná výška vodiče nad zemí. Tento fiktivní obvod nepodléhá změnám frekvence a materiálovým konstantám země i vodiče [2].

### 2.1.4 Svazkové vodiče

Používají se výhradně jenom pro přenosovou soustavu. Je to několik vodičů jednotného geometrického n-úhelníkového uspořádání, tvořící jednu fázi vedení. Na lana se připevňují spojky, které drží lana v přesné vzdálenosti od sebe po celou dobu vedení. Používá se u vvn a vyšších napětí. Nejčastější je, pro napětí 220 kV, dvousvazkový vodič. Pro napětí 400 kV, které je nejvyšší použité v ČR, se používá trojsvazkový vodič a čtyřsvazkový vodič do 1000 kV. Pro napětí 1000 kV, a vyšší, se staví osmisvazkové vodiče. Svazkový vodič se chová jako kabel o velkém průřezu a snižují se tím ztráty korónou a okolní rušení.



Obr. 2-2 Spojka svazkového vedení

## 2.2 Kabelové vedení

Parametry kabelového vedení závisí hlavně na materiálu jádra a pláště, počtu vodičů a ochrany vodičů (stínění, pancíř atd.). Počítají se podobně jako u venkovního vedení. U resistance kabelového vedení se zanedbává jenom vliv průhybu. U jednožilových kabelů s vodivým pláštěm, lze do zvětšení resistance zahrnout ztráty vířivými proudy a hysterezí, které mohou být několikanásobně větší než u ohřevu vodiče stejnosměrným proudem. Ztráty se snižují pokládáním vodičů co nejbližší k sobě. Vícežilové kabely zvětšují svoji rezistanci kvůli kroucením žil. Indukčnost lze snížit použitím sektorového uspořádání kabelu, až o 10% oproti kruhovému vodičům. Konduktanci způsobují ztráty v dielektriku při namáhání izolace střídavým napětím. Kapacita je závislá na relativní permitivitě izolačního materiálu. Jeho vlastnosti se mění stářím, teplotou a elektrickým namáháním. Provozní kapacita je vyšší než u venkovního vedení [2].

## 3. ELEKTRICKÉ VEDENÍ

Je to základní prvek pro přenosové a distribuční soustavy. Představuje soubor prvků určených pro přenos elektrické energie mezi jednotlivými uzly elektrické sítě. Elektrická vedení dělíme na kabelové a venkovní. Použití kabelového či venkovního vedení je závislé na lokálních technických či topografických podmínkách. Roste také požadavek na bezpečnost i spolehlivost provozu elektrického vedení. V posledních letech roste také ekologický význam na výstavbu elektrických sítí, ale i na provoz distribučních soustav, tím pádem se dynamicky rozrůstá možnost izolovaných vedení [4].

Distribuční síť v české republice patří mezi jedny z nejkvalitnějších v Evropě. Neustále musí reagovat na všechny změny v energetice a tím pádem se neustále rozvíjí, modernizuje a staví nové vedení. V posledních desetiletích se výrazně zvětšilo množství přenášené elektrické energie, vlivem neustálého růstu spotřeby uživateli a rostoucího mezinárodního obchodu. Stavěním elektráren na obnovitelné zdroje se změnil energetický mix a tím se změnila i konfigurace distribuční sítě [5].

### 3.1 Materiál vodičů

Výběr vhodného materiálu vodiče zásadně ovlivní parametry vodiče, především ztráty na vedení. Materiál vodiče se musí vhodně vybrat podle elektrické vodivosti, mechanické pevnosti, hmotnosti, ekonomické hodnotě a místem, kde bude vodič procházet.

#### 3.1.1 Měděné vodiče

Měď má výborné elektrické a mechanické vlastnosti, ale i dobrou odolnost proti přírodním vlivům. Nečistoty v mědi snižují její elektrovodné vlastnosti. K odstranění nežádoucích nečistot z mědi se používá žihání. Československá norma ČSN 42 3001 určuje čistotu mědi nejméně 99,9%. Nevýhodou je velmi vysoká cena a proto se používají jen velmi výjimečně.

#### 3.1.2 Hliníkové vodiče

Je hned po mědi nejdůležitější elektrovodný materiál. Vyrábí se z bauxitu, což je hornina s vysokým obsahem oxidu hlinitého. Stejně jako u mědi se z hliníku odstraňují nečistoty pomocí žihání. Vyžaduje se čistota nejméně 99,5%. Hliník má dobrou vodivost, ale malou mechanickou pevnost. Ve venkovním vedení se hliník používá jen v kombinaci s nosným lanem. Výhodou je jeho nízká cena.

#### 3.1.3 Bronzové vodiče

Je to slitina cínu a mědi. Bronz má horší vodivost, ale velkou mechanickou pevnost. Používá se u vedení, u kterých je vyžadována velká pevnost (přechody přes řeku, křižovatky vedení atd.)

### 3.1.4 Železné vodiče

Má výborné mechanické vlastnosti, ale nízkou elektrickou vodivost. Je o mnoho levnější než měď, používá se tam, kde je vedení občas nebo nepatrně zatíženo (svod hromosvodů, zemní lano atd.) nebo kde se využívá jako nosný materiál.

### 3.1.5 Slitinové vodiče

Byly vyvinuty, aby se potlačily špatné mechanické vlastnosti hliníku. Slitiny hliníku mají větší mechanickou pevnost. I tyto materiály se používají v kombinaci s nosným lanem nebo se využívají jako přípojnice venkovních rozvodů [6].

## 3.2 Venkovní vedení

Je to zařízení pro přenos elektrické energie, u kterého je bezpečnost před nebezpečným dotykem řešena polohou. Je tvořeno lany, která jsou zavěšena ke stožárům vedení a přichyceny k izolátorům. Při stavbě musí být brán ohled na dostatek volného prostoru kolem vedení. Vodiče a zemní lano jsou nejdůležitější částí vedení a také rozhodují po ekonomické stránce. Volba vodičů určuje nejen cenu, ale i konstrukci stožáru a tím bezpečnost venkovního vedení. Náklady na postavení jsou daleko menší než u kabelového vedení. Vodiče venkovního vedení jsou vystaveny různým klimatickým podmínkám (děšť, vítr, námraza, změna teploty atd.), proto požadavky na ně jsou rozdílné a často protichůdné:

- Nízká hmotnost vodiče kvůli manipulaci, ale vysoká hmotnost kvůli působení větru.
- Malý průměr vodiče, kvůli přírodním podmínkám, ale velký pro omezení ztrát korónou.
- Vysoká mechanická pevnost.
- Odolnost proti vibracím.
- Odolnost proti změnám teploty.
- Odolnost proti chemickým vlivům.
- Nízká cena [4], [6].

### 3.2.1 Konstrukce venkovních vodičů

Konstrukce vodičů nám určuje vzdálenost ochranného pásma, a tím nám určují, kde se bude vodič využívat. Neizolovaný vodič se bude používat mimo osídlené oblasti, zatím co izolovaný vodič bude použit v osídlených oblastech.

#### 3.2.1.1 Kombinované (holé) vodiče

Je to základní typ proudovodného vodiče ve venkovním vedení. Jsou to vodiče udělané ze dvou materiálů. Jeden nosný, tvoří jádro a má velkou mechanickou pevnost. Druhý, elektrovodný, tvoří plášť a má velkou elektrickou vodivost. Používá se různých kombinací kovů (Al+Fe, slitiny: Al+Fe, Cu+Fe, Cu+bronz). Nejčastěji jsou používány ocelohliníková lana (ocelové jádro a hliníkový plášť). Takové lano je pevnější než měděné. Velký průřez jádra lana, omezuje ztráty korónou. Nevýhodou je jen náchylnost k vibracím, a proto je nutno lana před nimi chránit [6].

### 3.2.1.2 Jednoduché izolované vodiče

Jsou to komprimovaná lana, slaná z hliníkových drátů o stejném průměru a opatřená izolací. Je to pouze základní izolační ochrana. Udělaná je z PVC nebo ze zesíťového polyetylenu a je odolná vůči přírodním podmínkám a UV záření, ale není určena k trvalému spojení vodičů. Proto se nejedná o ochranu před nebezpečným dotykem živých částí. Venkovní vedení s izolovanými vodiči se staví podobně jako s holými vodiči. Rozdíl je jenom v menší vzdálenosti mezi mezifázovými vodiči, asi o jednu třetinu, a ochranné pásmo vedení je sníženo na 2 m od krajního vodiče. V ČR jsou nejčastěji používané průřezy izolovaných vodičů: 50 mm<sup>2</sup>, 70 mm<sup>2</sup> a 120 mm<sup>2</sup> [4], [7].

Použití pro vn vedení:

- Místa s požadavkem zúžení ochranného pásma.
- Místa s vyšším nebezpečím pádu stromu do vedení.
- Výjimečně lze vedení budovat jako vícenásobná.

### 3.2.1.3 Slané závěsné kabely

Jsou to třížilové svazkové kabely s plnou izolací a stíněním. Další izolaci už nepotřebují. Jsou bezpečné proti dotyku a jsou mnohem spolehlivější. Závěšené jsou kolem pozinkovaného ocelového lana. U nn vedení se používají čtyři slané vodiče s hliníkovým jádrem s izolací žil a s nosným ocelovým jádrem. V dnešní době se holé vodiče nahrazují izolovanými vodiči, které mají lepší vlastnosti (přenosovou schopnost, estetiku atd.). Pro vn soustavu mají vyšší cenu a používají se jen zřídka [4], [7].

Použití pro vn vedení:

- Hustě zastavěné oblasti, kde není možné se připojit na venkovní transformační stanici a vedení zemním kabelem je technicky nemožné.
- Místa kde není možné použít zemní kabel.
- Havarijní a dočasné odběry elektrické energie.
- Výjimečně při vedení blízko jiných objektů nebo elektrického vedení [4].



Obr. 3-1 Závěsný kabel

### 3.2.2 Dělení podle hladiny napětí

Distribuční soustavu v ČR dělíme podle hladiny napětí na vvn (110 kV), vn (35 kV a 22 kV) a nn (400 V).

#### 3.2.2.1 Vedení vvn

Slouží pro přenos velké elektrické energie na velké vzdálenosti do míst s velkou koncentrací odběrů. Vedení může být dlouhé několik desítek kilometrů, a proto musí být velice spolehlivé. Vedení bývá dvojitě a staví se jako okružní rozvod. Je tvořeno z holých ocelohliníkových lan (AlFe) na železných stožárech.

#### 3.2.2.2 Vedení vn

Používá se k přenosu elektrické energie k velkým spotřebitelům (firmy, města, obce atd.). Jsou kratší než vvn vedení, ale zato jsou hustější. U tohoto typu vedení je kladen menší důraz na spolehlivost, než je tomu u vvn a staví se jako paprsková nebo okružní síť. Na vn se používají holé ocelohliníkové vodiče, jednoduché izolované vodiče a slané závěsné kabely umístěné na betonových sloupech, ale dají se najít také dřevěné sloupy [4], [7].

#### 3.2.2.3 Vedení nn

Je to nejnižší používaná hladina napětí v ČR. Může přenášet pouze omezené množství výkonu, které je limitováno úbytkem napětí na vedení. Nové venkovní vedení se staví v malých obcích s řídkou zástavbou, u samot a u síťových výběžků. Používají se izolované vodiče nebo závěsné kabely. Jsou stavěna jako paprsková nebo okružní síť. Umísťují se na betonové sloupy [4].

### 3.2.3 Stožáry venkovního vedení

Stožáry se používají jako nosný prvek pro venkovní vedení. Používají se pro všechny druhy napětí. Tvar stožáru závisí na vedeném napětí, počtu fázových vodičů a zemnicích lan na použitém materiálu, funkci stožáru, na topografickém profilu terénu a kvalitě podkladu [6]. Stožár musí vydržet velké klimatické a boční namáhání, které na něj vyvíjí déšť, námraza, rozdíl teplot, UV záření a hmotnost lan. Stožár slouží zároveň jako ochrana proti nebezpečí dotyku živých částí a proto musí být výška dostatečná i při průhybu vodičů, aby nemohlo dojít k přeskočení oblouku a náhodnému dotknutí fáze.

Stožáry dělíme podle materiálu na:

- **Dřevěné** - Jsou zapuštěné do země, nebo na betonové patce. Na vrcholu je přidělaný ocelový kryt, který drží izolátory a brání zatékání vody. Používají se pro vn a nn napětí, telekomunikaci a k veřejnému osvětlení.
- **Betonové** - Sloup je postaven z betonu vyztuženého ocelovými tyčemi. Manipulace je s nimi obtížnější než u dřevěného sloupu. Vršek je chráněn plastem a na něm je umístěn nosník. Je použit pro vn a nn napětí.

- **Ocelové** - Nejčastěji jako příhradové, které jsou poměrně lehké a dily se spojují na místě. Jejich nevýhoda je koroze a snadná možnost odřezání kusů sloupu. Proto se začínají stavět i ocelové, svařené s jednotlivých plátů plechu. Převážně se používají pro vvn napětí, ale i pro napětí vn a nn.

Jednotlivé stožáry rozdělujeme na:

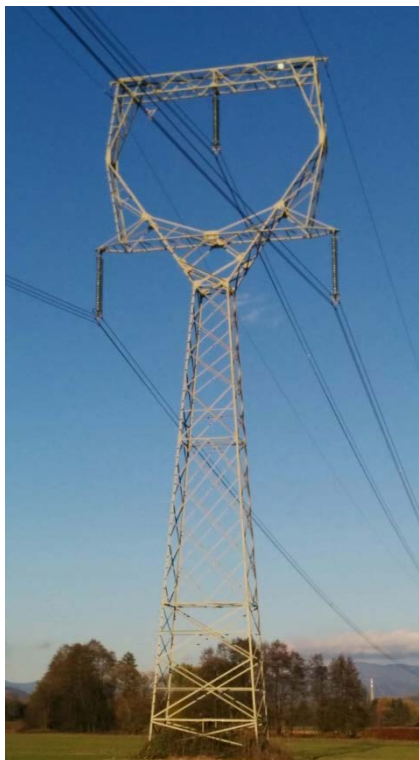
- **Nosné** - Odolává klimatu a hmotnosti vodičů, které jsou na nich zavěšeny.
- **Výstužné** - Jsou stavěny na trase po 3 - 5 km. Vodiče jsou zavěšeny na kotevních závěsech. Drží navíc ještě boční tah vodiče.
- **Rohové** - Staví se ve zlomu trasy a zavěšují se na nosné izolátory.
- **Křížovatkový nosník** - Staví se při křížení vedení s komunikací, říčním tokem nebo jiným elektrickým vedením. Je vyšší a musí splňovat větší požadavky na pevnost.
- **Koncový** - Na konci trasy musí odolávat velkému jednostrannému tahu, a proto je masivní.
- **Odbočný** - Pro odbočení vedení. Odolává více směrům tahu.
- **Rozvodný** - Pro rozdělení vedení na více vedení [6].

Rozdělení podle nohou:

- **Jednodříkové stožáry** - Jsou to čtyřhranné stožáry, které stojí na jedné noze. Podle výšky stožárů se noha, směrem k základům, rozšiřuje. U nejvyšších se stožáry ve spod prudčeji lomí nebo se rozkročují. Stožár je přibetonován, nebo přidělán na přibetonované trny.
- **Portálové stožáry** - Nejčastěji se používá dlouhý příčník, který je podepírán dvěma nohama. Na příčníku jsou zavěšeny izolátory, které drží fáze. Používají se převážně jako nosné stožáry. Výstužné stožáry jsou nižší, kvůli změně výšky izolátoru.
- **Kotevní stožáry** - Stavějí se jako portálové, nebo do písmene V, ale mají prostorovou konstrukci. Stabilitu zajišťují 4 kotevní ocelová lana, zakotvená do půdy.

### 3.2.3.1 Stožáry pro zvň a vvn

Stožáry pro vvn a zvň se používají jenom příhradové. Rozestupují se od sebe od 300 m (110 kV) až do 500 m (400 kV). Vedení může být jednoduché (vede jednu trojfázi), dvojité (vede 2 trojfáze) nebo vícenásobné. Příhradové stožáry jsou lehké a snadno se s nimi pracuje, ale materiál podléhá klimatickým změnám a korozi. Proti korozi se používá tradiční metoda (ochranný nátěr), pozinkování nebo protikorozní ocel.



*Obr. 3-2 Stožár 400 kV typu delta*

Typ stožáru se vybírá podle parametrů vedení (výkon, napětí, počet vodičů a zemnicích lan atd.), uspořádání vodičů, zatížení a způsobu spojování. Pro napětí vvn se používají podobné typy stožárů, ale pro 220 kV jsou vyšší a namáhanější. Pro 400 kV se používají velké konstrukce, které jsou hodně namáhány z důvodů těžkých vodičů. Hlava se používá podle potřeby a jsou to takzvané soudek, jedle, delta, kočka, dunaj [8].

### **3.2.3.2 Sloupy pro vn**

Pro stožáry vn napětí se používají sloupy ze všech materiálů. Za podpěry můžeme také použít stožárové trafostanice. Nejčastěji jsou to betonové sloupy. Sloupy mezi sebou mají menší odstupy než u vyšších napětí, jsou menší a nepůsobí na ně taková velká zátěž.

Nejpoužívanější typ podpěrného sloupu je betonový sloup. Používá se jeden nebo dva sloupy přidělané k sobě. Dvojitě sloupy mají dvojnásobně větší povolené namáhání. Jsou určeny pro jednoduché i dvojitě vedení. Sloup má na konci kryt proti zatékání vody a přimontované konzole pro uchycení vodičů a dalších zařízení.





*Obr. 3-3 Betonový sloup 22 kV*

Příhradové stožáry jsou určeny pro dvojnásobná a vícenásobná vedení. Pro jednoduchá vedení se využívají jen v případě uložení vyššího podpěrného bodu. Součástí sloupu je konzole pro připevnění sloupu popřípadě i zemní lano, spínače atd. Ocel se chrání proti korozi.

Dřevěné sloupy se používají pouze v případě, že není možné postavit betonový sloup z důvodu ochrany prostředí nebo znepřístupnění mechanizace. Používají se pouze pro jednoduchá vedení. Používá se jeden nebo dva sloupy přidělané k sobě. Sloup je přímo zasazen do země a je impregnován proti škůdcům a houbám.

Plechové sloupy se používají pro jednoduchá vedení, kde není přístup k mechanizaci. Jsou podélně svařené z tenkého plechu do kruhovitého, nebo mnohoúhelníkového tvaru. Sloupy jsou lehčí a mají větší životnost než dřevěné sloupy. Pro konzole mají předem vyvrtané díry.

### **3.2.3.3 Sloupy pro nn**

Betonové sloupy tvoří nejpočetnější část z podpěrných sloupů. Používá se jeden nebo dva sloupy přidělané k sobě. Jsou určeny pro jednoduchá i dvojítá vedení. Každý sloup je označen štítkem výrobce. Pod štítkem je otvor pro zemnicí kabel. Sloup má na konci kryt, zabraňující zatékání vody, a přimontovány konzole pro uchycení vodičů a dalších zařízení.

Dřevěné sloupy se využívají pro telekomunikační kabely a starší nevyměňené vedení. V dnešní době se využívá ve městech jako okrasný sloup pro veřejné osvětlení. Sloupy se dále používají v případě, kde není možné použít mechanizaci a z důvodu ochrany prostředí. Používají se pouze pro jednoduchá vedení. Sloup je na betonovém podkladu nebo přímo zasazen do země a je impregnován proti škůdcům a houbám.

Plechové sloupy se používají pro vedení, kde není přístup k mechanizaci. Jsou vyrobeny v továrně a zhotoveny na místě. Sloupy jsou lehčí a mají větší životnost než dřevěné sloupy. Pro konzole mají předem vyvrtané díry [4].

### 3.3 Kabelové vedení

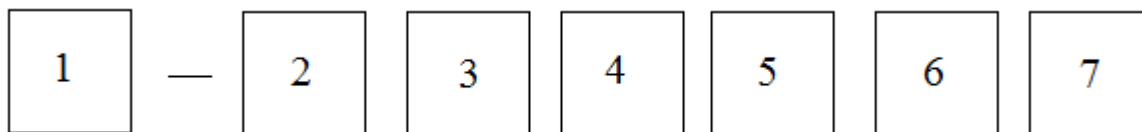
Používá se v případech, kde nelze z prostorových, bezpečnostních, klimatických nebo jiných důvodů postavit venkovní vedení. Jsou to místa s velkou hustotou zástavby a odběratelů. Kabely jsou uloženy volně v zemi, v rourách nebo v kanálech. Často se používá kombinace obou vedení. Oproti venkovnímu vedení jsou náklady na kabelové vedení několikanásobně vyšší. Postavením kabelového vedení, mizí z okolí sloupy pro venkovní vedení, čímž se zlepší vzhled krajiny [5], [7].

#### 3.3.1 Konstrukce kabelových vodičů

Konstrukce kabelů nám určuje, kde se bude kabel využívat. Kabel se základní izolací se bude používat pro běžné zapojení. Kabel s dvojitou izolací a pancířem se bude používat ve sžitých podmínkách, kde bude muset odolat mechanickému a chemickému zatížení.

##### 3.3.1.1 Značení kabelů

K určení typu kabelu a materiálu, ze kterého je vyroben a k čemu je uzpůsoben, se používá, pomocí písmenného a číselného značení, popis povrchu pláště. V každé zemi se používá jiné značení, a proto se můžeme setkat s různým značením, hlavně u dovezených kabelů. U nás se používá takzvaně neharmonizované národní značení, které má následující schéma:



Obr. 3-4 Značení kabelů

1. Jmenovité napětí:
  - Bez označení - 750 V
  - S číselným označením odpovídá určitému napětí v kV
2. Materiál jádra:
  - A - hliník
  - C - měď
  - AV - hliník vodotěsný
  - CV - měď vodotěsná
3. Materiál izolace:
  - B - kaučuk se zvýšenou tepelnou odolností
  - G - běžný typ kaučuku
  - H - kaučuk na bázi EPR
  - E - lineární PE
  - X - zesítlý PE
  - U - vulkanizát z chloroprenového kaučuku
  - Y - PVC běžný typ
4. Rozlišení typů vodičů:
  - A - kulatý vodič
  - D - důlní vodič
  - F - stíněný vodič

- K - silový kabel
  - L - lehká šňůra
  - S - střední šňůra
  - T - těžká šňůra
  - V - vlečný vodič
  - Z - svařovací vodič
5. Materiál pláště:
- B - kaučuk se zvýšenou tepelnou odolností
  - G - běžný typ kaučuku
  - H - kaučuk na bázi EPR
  - C - stínění z mědi nebo měděný koncentrický vodič
  - F - kovové pletení nebo vinutí
  - O - olovený plášť
  - U - vulkanizát z chloroprenového kaučuku
  - Y - PVC běžný typ
  - Z - zdravotně nezávadný plášť
  - OY - olovený plášť s PVC
  - VC - měděné stínění s ochranou proti podélnému šíření vody pod pláštěm
  - VE - PE plášť s bariérou proti příčnému proniknutí vody
  - YE - PE s PVC
6. Obal nad pláštěm:
- D - pancíř z ocelových drátů
  - P - pancíř z ocelových pásků
  - Z - pancíř z nemagnetických ocelových drátů
  - E - lineární PE
  - Y - PVC běžný typ
7. Zvláštní označení:
- l - lištový kabel
  - m - mrazuvzdorný kabel
  - s - samonosný kabel
  - spec - speciální kabel
  - o - oválný kabel
  - z - závěsný kabel [6]

### 3.3.1.2 Klasické kabely s papírovou izolací

Kabely se pokládaly v 70. letech. V dnešní době se nevyrábějí, ale vzhledem k dlouhé životnosti kabelů se s nimi můžeme setkat.

Konstrukce kabelů používá omotanou papírovou izolaci kolem jádra kabelu. Pásky byly impregnovány v minerálním oleji, aby tvořily potřebnou elektrickou pevnost. Když byly konce kabelů uloženy v různé výšce, použila se nestékavá izolace, která není tekutá při provozní teplotě. Žíly jsou zapleteny a omotány oloveným pláštěm. Plášť se obvykle omotával páskou nebo PVC, která bránila v korozi pláště. Nejčastější typ je omotán dvěma ocelovými pásky, které se používají jako pancíř, co chrání kabel před mechanickým poškozením. Nakonec je na kabelu vlákninový obal natřený asfaltem.

Pancíř kabelů se upravoval podle použití. Pancíř pro kabely namáhané tahem se používal z ocelových drátků místo pásků, které by se rozplétaly. Pro pevné uložení kabelů do trubek nebo zdi se používal holý plášť bez pancíře.

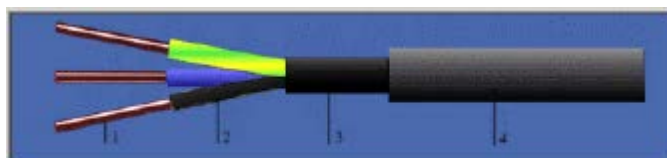
Staré kabely s papírovou izolací jsou nahrazeny novými druhy kabelů, které se dělí podle druhu výtlačně lisované izolace. Oproti starým kabelům s papírovou izolací mají tyto kabely významné výhody:

- Při poškození nevzniká riziko vytečení oleje do okolí.
- Dají se pokládat svisle i šikmo.
- Nižší hmotnost kabelů a tím lepší manipulace.
- Pokládají se větší délky.
- Menší počet spojek.
- Jednodušší montáž.
- Jsou bezúdržbové.

### 3.3.1.3 Celoplastové kabely s izolací z PVC

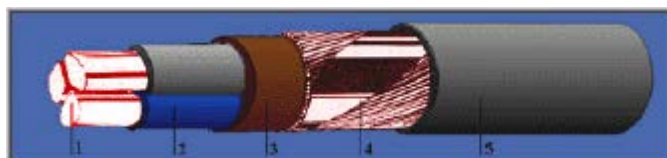
Jsou to nejrozšířenější kabely pro napětí do 6 kV. I když je PVC dražší než zesítný polyetylén (XPE), je jeho výhoda v tom, že je to samozhášecí materiál. Nevýhodou je, že PVC při tepelném namáhání nebo hoření uvolňuje do okolí chlorovodík, který působí korozivně na ostatní materiál a negativně působí na zdraví člověka.

**CYKY**- Všeobecně používaný celoplastový kabel do 1 kV. Nejvhodnější do prostor bez mechanického namáhání. Nejčastěji se používá jako tří- nebo pětižilový. Žíly jsou obaleny v PVC izolaci. Další vrstva je výplňový obal a nakonec plášť z PVC.



Obr. 3-5 CYKY [6]

**NYCWY** - Celoplastový kabel s koncentrickým vodičem pro uložení na vzduch i do země, používaný pro napětí do 1 kV. Koncentrický vodič je stínění, které zároveň může sloužit jako ochranný nebo střední vodič [6].



Obr. 3-6 NYCWY [6]

### 3.3.1.4 Kabely s izolací ze zesítného polyetylénu

Zesítný polyetylén má díky příčným vazbám dobrou tvarovou stálost a oproti lineárnímu polyetylénu i lepší mechanické vlastnosti. Působením vysokého tepla se netaví, díky prostorové síti chemických vazeb, a při vysoké čistotě izolace jsou zaručeny vysoké elektrické, mechanické a tepelné vlastnosti.

Výhody zesítěného polyetylénu:

- Pevnost v tahu.
- Vyšší izolační odpor.
- Vyšší proudová zatížitelnost a zkratová zatížitelnost.
- Malé dielektrické ztráty.
- Malá permitivita.

**CXKCE** - Základní provedení kabelu. Má na jádře vnitřní polovodivou vrstvu, která vyhlazuje elektrické pole na povrchu vodiče a je spojena dohromady s izolací ze zesítěného polyetylénu a vnější polovodivou vrstvou. Podle tloušťky izolace se používá pro různé napětí:

- 3,4 mm pro 10 kV
- 5,5 mm pro 22 kV
- 9 mm pro 35 kV



Obr. 3-7 CXKCE [6]

**CVXEKVCE** - Kabel, který má zvýšenou odolnost proti vlhkosti (kapající voda, stříkající voda, přechodné zaplavení atd.). S izolací je pevně spojena vnější a vnitřní polovodivá vrstva. Na ní je umístěna vodublokující páska proti šíření vody do spodní izolace. Dále je kabel omotán měděným stíněním, z pásek nebo drátků, a je omotán další vodublokující páskou. Nakonec je kabel omotán svařovanou hliníkovou fólií a plášť kabelu je tvořen z polyetylénu. Vodotěsnost pláště se zkouší tak, že se přiloží napětí mezi stínění a zem a měří se prosakující proud. Vyrábí se v několika variantách, které se liší v počtu a umístění voděodolné ochrany a druhem pláště.



Obr. 3-8 CVXEKVCE [6]

### 3.3.1.5 Kabely s izolací z kaučukového vulkanizátu

Guma se vyrábí z přírodního nebo syntetického kaučuku, který se vulkanizuje a je z toho pružná makromolekulární látka. Vlastnosti hlavně závisí na použitém kaučuku, vulkanizačních činidlech a dalších přísadách při jeho zpracování. Na izolaci je důležitý rozsah teplot, při nichž se dá používat, odolnost vůči stárnutí a působení okolních vlivů (Sluneční záření, rozpouštědla, tuky atd.). Nedostatkovému přírodnímu kaučuku se nejvíce podobá syntetický izoprenový kaučuk. Dále se využívají syntetické kaučuky jako butylkaučuk, chlórénový, etylénpropylénový a silikonový. Guma se používá u ohebných vodičů, ale i tak je nahrazována termoplasty.

**CGSU** - Střední kabel, který má pryžovou izolaci. Používá se u pohyblivých přívodů spotřebičů a zařízení určených k těžším pracím v obyčejném, studeném, horkém, vlhkém nebo mokřém prostředí. Vodiče jsou dobře odolné na klimatické zatížení a oleje. Používají se v síti do 1 kV.



Obr. 3-9 CGSU [6]

### 3.3.1.6 Kabely vvn

Jádro kabelu vvn bývá většinou tvořené z mědi a jeho průřez může dosáhnout hodnoty až  $1300 \text{ mm}^2$ . Když průřez jádra přesáhne hodnotu  $630 \text{ mm}^2$ , skládá se z navzájem lehce odizolovaných segmentů. Duše vytvořená ze segmentů umožňuje prakticky zanedbat ztráty vzniklé vlivem efektu přiblížení.

Na jádro je vytlisováno polovodičové pouzdro, které má za úkol vyloučit vliv pramenů a zabránit, aby vzduch na povrchu duše ionizoval. Polovodičové pouzdro je také zalisováno do izolačního obalu vyrobeného z polyetylenu. K zabránění i té nejmenší přítomnosti vzduchu mezi izolací jádra a vnějším polovodičovým pouzdrem, je nutné docílit dokonalé přilnavosti mezi těmito dvěma materiály, proto se vnější vodivé pouzdro vyrábí ze dvou vrstev. První je extrudovaná zesílená polovodičová vrstva pevně spojená s izolací jádra. Druhá vrstva je namotána polovodičová páska.

Následující vrstva je stínění kabelu. Stínění kabelu je uděláno z měděné pásky a měděných drátků umístěných ve vodoblokující bobtnavé pásce. Nad nimi je opět přidána polovodičová vrstva. Plášť kabelu je z polyetylenu s vysokou hustotou, který vzdoruje stárnutí. Protože polyetylen je dokonale nepropustný, tak se odstraňuje nepropustný ocelový plášť a nahrazuje se jenom hliníkovým pláštěm. Takové řešení je jednodušší a zjednodušuje se i pokládání a manipulace s kabelem [6].



Obr. 3-10 Kabel 110 kV [6]

### 3.3.2 Dělení podle hladiny napětí

#### 3.3.2.1 Vedení vvn

Stavění velkých měst a firem, které zvyšují spotřebu elektrické energie, klade nárok na dopravu elektrické energie při co největším napětí přes zastavěné oblasti bez možnosti použití venkovního vedení a je nutno použít kabelového vedení. Když rozvod vn (22 kV) už není postačující, tak se musí použít napětí vvn, který je na to dostačující. Rozvoj vvn kabelů byl umožněn díky rozvoji izolace ze zesíleného polyetylenu, která má dobré dielektrické vlastnosti.

Vedení je umístěno převážně v podzemních kolektorech pod městem. Je to velmi drahý a technicky náročný systém [6], [7].

### 3.3.2.2 Vedení vn

Jsou nejčastěji používána ve velkých městech a firmách, u kterých není nutné použití vvn kabelů. Nejčastěji se využívají jako okružní síť. Kabely jsou nejčastěji vedeny v městských podzemních kolektorech, zavěšeny na kabelových lávkách. Také se zakopávají do země s pískovým ložem nebo jinou ochranou [7]. Na pronikání vlhkosti, je na vn vedení kladen velký důraz. Používají se následující kabely s polyetylenovou izolací:

#### **Jednoplášťový kabel se základní bariérou proti vniknutí vody**

Standardně se používá vn kabel s jedním pláštěm z lineárního polyetylenu s bariérou proti podélnému vniknutí vody pod pláštěm kabelu. Kabel se ukládá do země s netlakovou spodní vodou. Používá se pro přívod do první distribuční transformátorové stanice a pro jejich propojení. A nakonec pro opravy poruch u klasických kabelů.

#### **Jednoplášťový kabel se zvýšenou bariérou proti vniknutí vody**

Standardně se tento kabel v tomhle provedení nepoužívá. Používá se pouze v krajních zdůvodnitelných případech.

#### **Jednoplášťový kabel s vodotěsným provedením**

Tento kabel se používá jenom na místech, kde se vyskytuje spodní tlaková voda (vodní sloupec se musí vyšplhat přes hladinu 2 m) a v případě, kdy je potřeba křížení s vodním tokem.

#### **Dvoupášťový kabel se základní bariérou proti vniknutí vody**

Kabel má přídatný plášť z PVC, který mu dává odolnost proti šíření plamene. Používá se v oblastech se zvýšeným nebezpečím požáru, jako jsou kolektory, na propojení transformátorů a vývody z kobek [4].

### 3.3.2.3 Vedení nn

Nn vedení slouží k rozvodu elektrické energie od transformátorů 22/0,4 kV až k přípojkové skříně odběratele. Staví se ve všech větších městech a obcích. Hlavní vedení se navrhuje jako okružní vedení, rozdělené na jednotlivé paprsky. Stejně jako vn vedení je uloženo v městských kolektorech nebo je zakopáno do země [5], [7].

### 3.3.3 Uložení kabelového vedení

Silové kabely se ukládají několika způsoby:

- Do výkopu v zemi.
- V kabelových kanálech, šachtách nebo mostech.
- Na lávce, konstrukci nebo stěně.
- Na nosném laně.
- V kolektorech.

#### Uložení kabelů do země

Ve volném prostoru to je nejpoužívanější metoda pokládání kabelů. Kabely o napětí do 1 kV, kde není riziko mechanického poškození, se mohou pokládat bez ochrany, ale musí být nad ně položena výstražná plastová fólie. Kabely musí být mezi sebou odděleny dostatečně velkou mezerou, jestliže jí nejde pro nedostatek místa dosáhnout, vloží se mezi ně svislá přepážka. Přepážka musí být dostatečně mechanicky pevná a elektricky odolná, aby nepropustila elektrický oblouk. Přepážkou jsou odděleny kabely, nad napětí 1 kV, které je nutné umístit nad sebe. Vést kabely nad sebou po celé délce vedení není povoleno. V místech vyššího mechanického zatížení (křížení s komunikací) se chrání kabely uložením do korýtek, nebo trubek jakéhokoliv materiálu (beton, ocel, plast atd.). Do výkopu lze ukládat kabely o různém napětí, ale musí být odděleny dostatečnou mezerou nebo přepážkou.

#### Uložení kabelů v kanálech, šachtách, mostech

Kanály jsou určeny k tomu, aby vedly velké množství různých kabelů. Používají se pro trasy s dostatečným prostorem (haly a budovy) a nedostatečným prostorem (chodby, dutiny stavebních konstrukcí), které mají velký odběr elektrické energie.

Rozeznáváme kanály:

- Průchozí (označeny B) - dá se u nich pracovat a procházet vzpřímeně.
- Průlezné (označeny C) - práce a průchod je možný jenom v sehnuté poloze.
- Shora přístupné (označeny A) - Po odkrytí ochranných desek, lze v kanále snadno pracovat s kabely.

Kabelová šachta je stejná, jako kabelový kanál, akorát jsou kabely umístěné ve svislé poloze se sklonem větším než 45°. Pro přístup ke kabelům slouží kabelové komory. Komory umožňují práci a manipulaci s kabely a jinými zařízeními k provozu tunelu nebo také k úniku z kabelového tunelu v případě nebezpečí.

Kabelový most je kabelový kanál připevněný k nosné konstrukci, na kterou je zavěšený a je průchozí.

Kabely se pokládají na rošty tak, aby jejich uložení bylo přehledné a zbytečně se nekřížily mezi sebou. Uložení je nástěnné, oboustranné nebo závěsné. Kabelový kanál je spolehlivý, bezpečný a hospodárný. Kanály musí být dostatečně větrané a při požáru se oheň nesmí šířit vzduchotechnikou. Kanály jsou rozděleny na jednotlivé úseky, které jsou nehořlavé a při požáru se automaticky uzavřou a spustí se automatické hašení práškem.



**Uložení kabelů na lávce, konstrukci nebo stěně**

V budovách lze kabely ukládat také na lávky, na stěnu nebo na strop, na nehořlavé podklady nebo rovnou na různé konstrukce. Kabely se přichytávají do konzol, pro uchycení na stěnu a na rošty, pro lávkové vedení. Kabely se přichycují příchytkami přímo k roštu, ale ve vodorovné poloze se přichytávat nemusí.

**Uložení na nosném laně**

Kabely se připevňují k nosnému lanu příchytkami nebo je nosný prvek přímo součástí kabelu [5].

**Uložení v kolektorech**

Představuje vyhloubený tunel, používaný hlavně pod velkými městy. Je to průchozí stavba sloužící k ukládání kabelového vedení, komunikačních kabelů, potrubí na zemní plyn, potrubí vodovodních, horkovodních, parovodních a odpadní vody. Uložené sítě jsou snadno dostupné a nevyžadují výkopové práce na vozovce.

## 4. STEJNOSMĚRNÉ VEDENÍ

### 4.1 HVDC vedení

Hlavní výhodou stejnosměrného vedení je jeho schopnost kontrolovat přenášený výkon mezi vysílací a přijímací stranou. Tato ovladatelnost může být využita pro stabilizaci střídavé sítě, k regulaci frekvence ostrovní sítě a k pomoci řízení frekvence generátoru, který je připojen k HVDC usměrňovači. Jalový výkon, který převodník HVDC spotřebuje, závisí na hodnotě řídicího úhlu. Takto může být výměna jalového výkonu mezi převodníkem a střídavou sítí řízena a střídavé napětí může být stabilizováno. Také můžeme použít kombinaci činného a jalového výkonu. Ztráty korónou jsou 5 - 10 krát menší než u střídavého napětí, při stejně velkém napětí a průřezu vodiče. Proto můžeme použít lehčí vodiče. Pro vedení používáme pouze dva vodiče. Na obou stranách vedení jsou měniče, které pracují jako usměrňovač, střídač nebo umožňují obě funkce. Vedení může být připojeno do nesynchronní sítě a nepřenáší se poruchy ani poklesy napětí. HVDC vedení je oproti střídavému napětí levnější na vedení, ale dražší v koncových bodech, kde se upravuje napětí [10], [11], [14].



Obr. 4-1 Stožár HVDC vedení [19]

### 4.2 Kabely

HVDC je vedeno jak nadzemním vedením, tak i podzemním a podmořským vedením. Nadzemní a podzemní vedení je podobné střídavému vedení, ale má o jeden vodič méně. Nejčastěji se používají podmořské kabely, se kterými se propojují ostrovy, ropné plošiny a větrné farmy.

### 4.2.1 Nadzemní vedení

U nadzemního vedení se používá velmi vysoké nebo ultra vysoké napětí. U tak vysokého napětí se musí udržovat velké ochranné pásmo, proto se používají sloupy, které jsou až 90 m vysoké. Vysoké sloupy zvyšují možnosti zásahu blesku, a proto tomu musí vedení odolat. Používá se k přenosu velkých výkonů na velké vzdálenosti.

### 4.2.2 Podmořské a podzemní kabely

Podzemní a podmořské kabely se rozšiřují díky stavbám na moři, propojování ostrovů a problémem při vykupování pozemků pro stavbu sloupů. Kabely neničí přírodu a nemusí se kácet lesy. Šířka ochranného pásma je díky izolaci menší než u nadzemního vedení. Pro vedení o výkonu 5 GW a napětí  $\pm 800$  kV je šířka ochranného pásma nadzemních kabelů 50 m a podzemních 12-15 m. Elektromagnetické pole okolo kabelu je téměř zanedbatelné. Výhody kabelů:

- Menší dopad na životní prostředí (nemusí se kácet les).
- Odolnost proti povětrnostním podmínkám.
- Menší ochranné pásmo.
- Snížení elektromagnetického pole.

## 4.3 Konfigurace HVDC vedení

### 4.3.1 Monopolární

Je to nejjednodušší technologie. Monopolární technologie je založena na principu usměrnění střídavého napětí pouze na kladnou složku a jako záporná složka slouží potenciál země. Přenos elektrické energie je veden pomocí jednoho vodiče a má pouze dva měniče napětí. Nevýhodou je, že se mění chemické vlastnosti vody a korodují materiály v okolí uzemnění vedení. Při poruše vedení dojde k výpadku celého vedení.

### 4.3.2 Bipolární

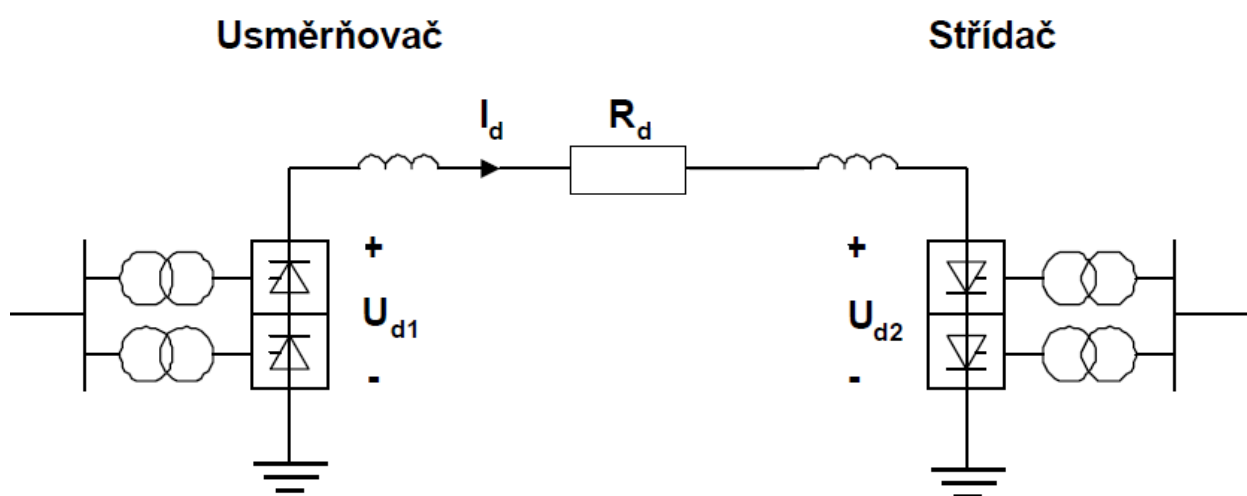
Bipolární technologie využívá oba potenciály, jak kladný, tak i záporný. Přenos elektrické energie je veden pomocí dvou kabelů. Díky dvěma kabelům má vedení vyšší spolehlivost a při poškození jednoho vedení se dokáže přenášet skoro polovina předchozího výkonu. Nevýhodou vedení jsou vyšší náklady na kabely.

### 4.3.3 Systém Back-to-back

Systém back-to-back je využíván na propojení asynchronních sítí, které mají na každé straně různou frekvenci [15].

## 4.4 Základní princip řízení

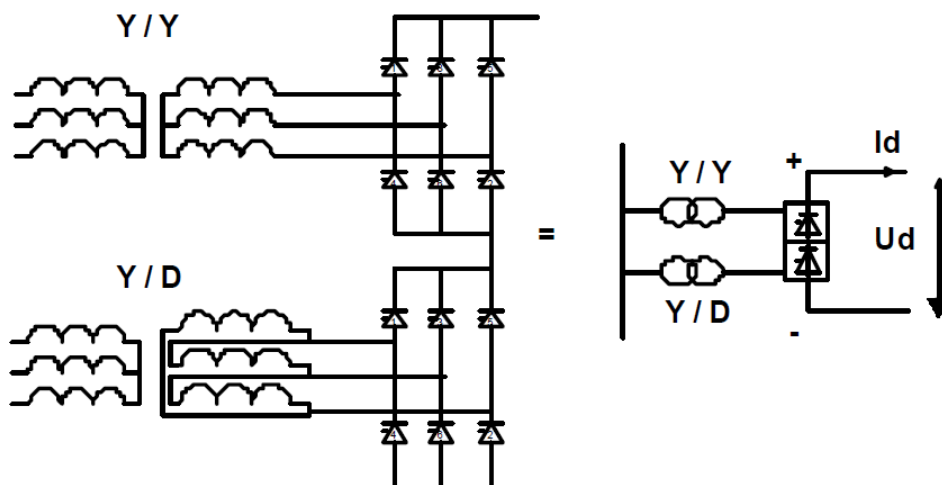
Základní koncepcí ovládání HVDC přenosu je možnost nastavení stejnosměrného napětí přes převodník (tyristorový most) a přenášený výkon změnou fáze na bráně řídicích pulzů u tyristorového mostu.



Obr. 4-2 Jednoduché schéma pro monopólní HVDC přenos [14]

### 4.4.1 Změna energie mezi střídačem a usměrňovačem

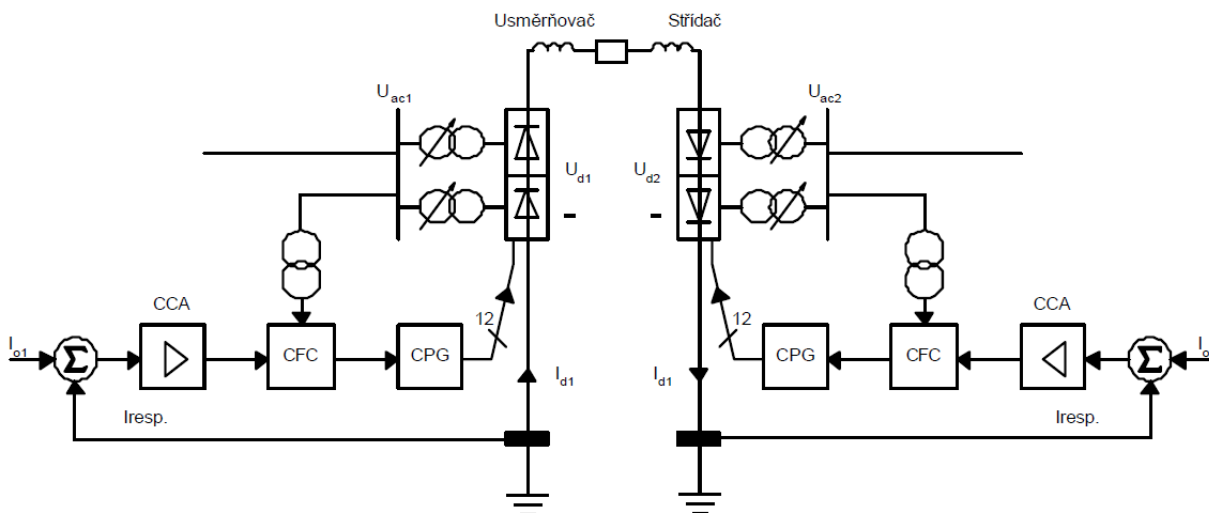
Běžnou konfigurací pro HVDC je 12-pulzní usměrňovač. V případě 12-pulzní usměrňovačů jsou dva 6-pulzní měniče připojeny do série. Můstek poskytuje připojení transformátoru Y/y a druhý zapojení transformátoru s Y/d. Vytvoření stejnosměrného obvodu se zpětnou vazbou v jednom z měničů, se většinou dělá na straně usměrňovače. Díky zpětné vazbě řídicího systému v usměrňovači, vzniká rozdíl napětí mezi vstupem a výstupem ( $U_{d1} - U_{d2}$ ), ten je automaticky udržován na 5. úrovni, která říká, že přednastavené stejnosměrné napětí může být přeneseno do střídače. Tím získáme základní HVDC přenosovou soustavu.



Obr. 4-3 Schéma 12- pulzního usměrňovače [14]

## 4.5 Základní řídicí systém HVDC

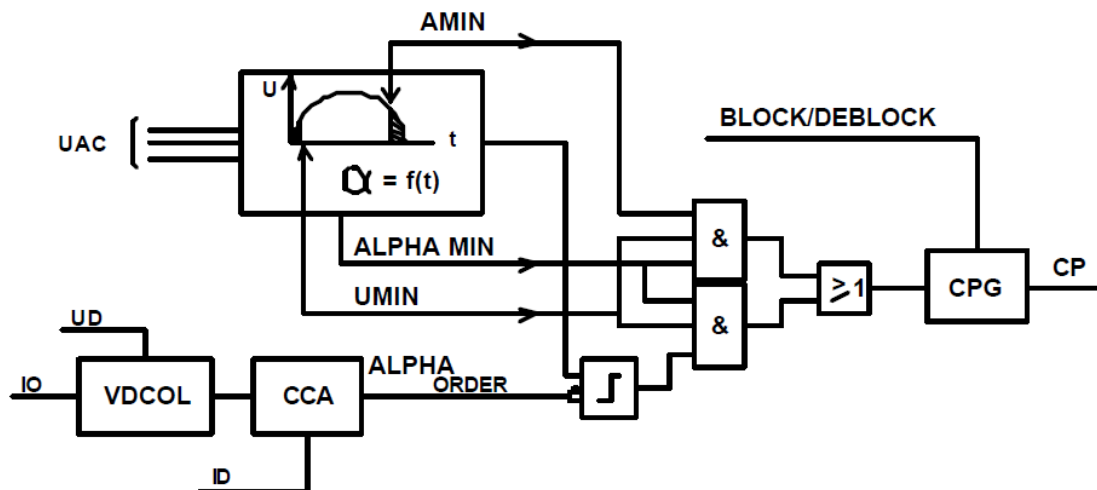
Řídicí systém je znázorněn na **obr. 3.**, což je základní ovládání systému, potřebné pro provoz HVDC systému. Rozlišuje provoz mezi usměrňovačem a střídačem. Obě stanice jsou vybaveny stejnou řídicí funkcí, pouze s některými předem nastavenými parametry. Oběma stanicemi teče stejně velký proud, ale okrajový proud  $\Delta I$  je odečten ze střídače tak, aby účinný proud v této stanici byl nižší než v usměrňovači.



Obr. 4-4 Řídicí systém [14]

### 4.5.1 Řídicí systém spouštění měničů (CFC)

Řídicí systém spouštění měničů stanovíme pomocí okamžitého proudu  $I_0$ , který předěláme na spouštěcí impuls (CP) takovým způsobem, že okamžitý proud zůstane zachován. Dynamika přenosu HVDC systému je určena především průchodem přes napěťově závislý omezovač proudu (VDCOL) a zesilovač řízený proudem (CCA).



Obr. 4-5 Schéma řídicího systému s kontrolou spouštění [14]

#### 4.5.1.1 Napětově závislý omezovač proudu (VDCOL)

Při nízkém stejnosměrném napětí se okamžitý proud sníží pomocí omezovače napětí. Účelem této funkce je zabránit nestabilitě střídavého napětí, ke které může dojít, když je vysoké napětí vpuštěno do nestabilní střídavé sítě. Dále se používá k dosažení regulované obnovy bez selhání sítě. Při obnově střídavé sítě musí být jalový výkon pouštěný do měniče často omezen. To je provedeno pomocí VDCOL, který snižuje přenášené stejnosměrné napětí na nízké napětí.

#### 4.5.1.2 Zesilovač řízený proudem (CCA)

Výstupní signál ze zesilovače je zpožděný úhel, který je použitý jako vstupní příkaz ke spouštění řídicího systému. Signál může být přímo úměrný  $\alpha$ , nebo to může být jeho funkce. To by mělo být omezeno jen na oblasti mimo povolenou oblast pro  $\alpha$ , mezi  $\alpha_{\min}$  a  $\alpha_{\max}$ . CCA je potřeba pro proudovou zpětnou vazbu. To by mělo mít dostatečně vysoké zesílení, aby reguloval okamžitý proud  $I_0$  s vhodnou odezvou, aby byl zesilovač stabilní a rychlý.

#### 4.5.1.3 Kontrola spouštění

Cílem kontroly spouštění je převod spouštěcího úhlu  $\alpha$ , pro spouštění impulzů, který je dále převeden na správné tyristory v převodníku a ve správném intervalu. Spouštěcí úhel je mezi  $\alpha = \alpha_{\min}$  až  $\alpha = \alpha_{\max}$ , druhý úhel se stanoví z mezní hodnoty minimálního úhlu zhášení  $\gamma$ . Povolené změny spouštěcího úhlu závisí na operačním režimu. Nejdůležitější práce kontroly spouštění je ujištění, že se ve správném okamžiku objeví nastavená hodnota na tyristorech. Například, aby se zabránilo příliš rychlé změně malé  $\gamma$  v oblastech, kde výměny mohou být neúspěšné. Toho je dosaženo prostřednictvím následujících funkcí:

- Střídavé napětí musí dosáhnout určité úrovně ( $U_{\min}$ , odpovídající přibližně  $\alpha = 5^\circ$  v normálním napětí) proti spuštění tyristorů. Pro provoz střídače je hodnota  $\alpha_{\min}$  nastavena přibližně na  $90^\circ$  tak, aby se zabránilo převrácenému napětí a tím pádem zpětnému výkonu.

- Prediktivní úhel zhášení  $\alpha_{\min}$  zajišťuje, že úhel zhášení  $\gamma$  se drží nad minimální hodnotou, obvykle  $17^\circ$ , aby se minimalizovalo riziko selhání výměny.

#### 4.5.1.4 Generátor spínacích impulsů (CPG)

Kontrola spouštění nařizuje generátoru spínacích impulsů (CPG) generovat spínací signály, individuálně pro každou bránu tyristoru převaděče. Příkaz  $\alpha$  z CCA je přímo poslán na správné hradlo generátoru spínacích impulsů tak, aby odpovídal správnému úhlu. CPG pak rozděluje řídicí pulzy do správného tyristoru. Pro každý tyristor je odeslán ovládací puls, tedy pro 12-pulzní most je odesláno 12 impulsů za cyklus. Navíc v této soustavě se také provádí výběr bloků a bloků s bypass páry, odblokování a výběr bypass párů. Příkazy jsou přijímány ze sledu pólů, nebo z ochrany.

#### 4.5.2 Spouštění kontroly operačních režimů měniče

Jak bylo uvedeno výše, okamžitý proud  $I_0$ , který teče do střídače je menší než mezní proud  $\Delta I$ , který teče z usměrňovače. To znamená, že napětí dodané usměrňovačem je vyšší než požadované napětí střídače. Střídač se to snaží neutralizovat pomocí zvýšení řídicího úhlu  $\alpha$ . Pokud je usměrňovač schopen usměrnit proud procházející střídačem, tak  $\alpha$  dosáhne své maximální hodnoty, která je stanovena minimální hodnotou zhášecího úhlu  $\gamma$  a CFC bude pracovat se zhášecím úhlem  $\gamma$  v kontrolním provozním režimu.

Pokud usměrňovač nemá dostatečně vysoké maximální napětí, například to může být způsobeno nízkým střídavým napětím, střídač převeze řízení proudu. Proud procházející usměrňovačem bude nižší než okamžitý proud, a to kvůli meznímu proudu  $\Delta I$ . Aby byl střídač schopný dodat okamžitý proud, musí se úhel  $\alpha$  snížit co nejrychleji. Tedy minimální zpoždění úhlu  $\alpha$  v operačním režimu je získáno ze zesilovače řízeného proudem. CFC je tak schopno pracovat v kterémkoli z následujících režimů, určených pomocí CCA:

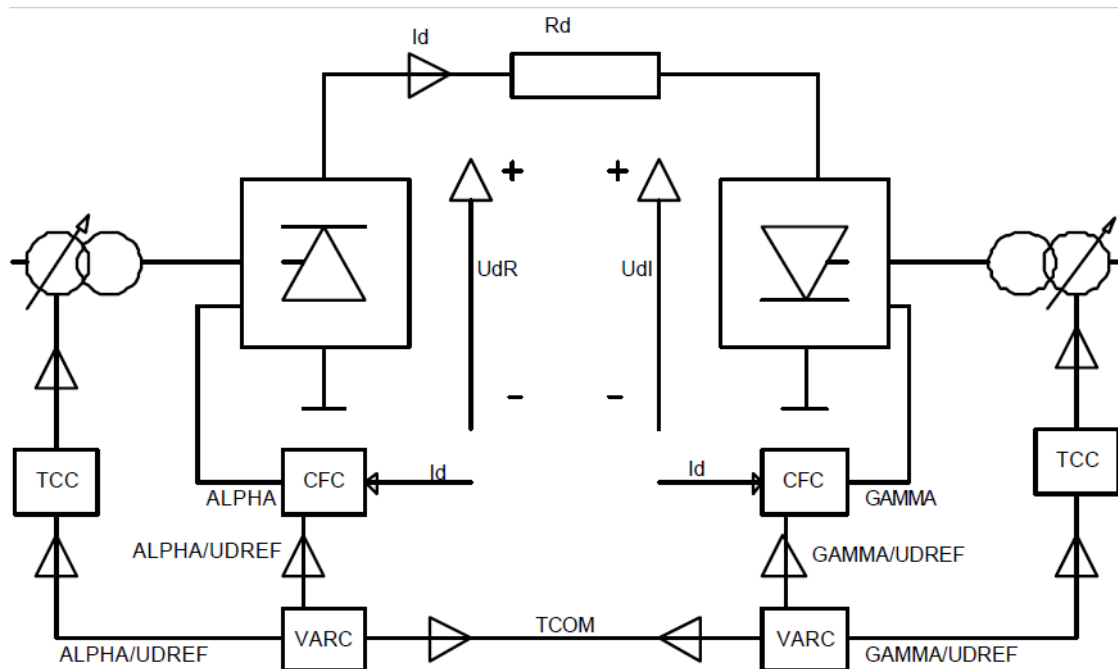
- Kontrola minimálního zpoždění úhlu  $\alpha$
- Kontrola konstantního stejnosměrného proudu
- Kontrola minimálního zhášecího úhlu  $\alpha$
- Kontrola konstantního stejnosměrného napětí.

### 4.6 Další řídicí funkce HVDC

#### 4.6.1 Výpočet referenčního napětí a úhlu $\alpha$ (VARC)

Cílem výpočtu referenčního napětí a úhlu je zajištění toho, aby se stejnosměrné napětí  $U_d$ , zhášecí úhel  $\gamma$  a spouštěcí úhel  $\alpha$ , dostaly do ustáleného stavu. To je provedeno na základě výpočtu referenční hodnoty stejnosměrného napětí, úhlů  $\gamma$  a  $\alpha$ , které jsou pak odeslány do řídicího zařízení pro přepínání odboček. Referenční hodnoty stejnosměrného napětí a  $\gamma$  jsou poslány do řídicího systému spouštění měničů (CFC).

$U_d$ ,  $U_{di0}$  a úhly jsou vedeny mezi dvěma stanicemi, pro různé provozní režimy a hladiny výkonu. Stejnosemné napětí, které je stejné v obou stanicích, s výjimkou úbytku napětí na odporu vedení, je řízeno pomocí VARC. Telekomunikační linka se používá pro výpočet odporu vedení. Stejnosemné napětí je řízeno pouze jednou stanicí, k zajištění správné regulace napětí použijeme odpor. Během telekomunikačních výpadků je vypočtená hodnota odporu zamrzlá.



Obr. 4-6 Přehled VARC [14]

#### 4.6.2 Řídicí zařízení pro přepínání odboček (TCC)

Řídicí zařízení pro přepínání odboček (TCC) je systém, který je navržený tak, aby ovládal odbočky měniče transformátoru pod zátěží. Cílem TCC je, aby nastavil stejnosměrné napětí, úhly  $\alpha$  a  $\gamma$  na přednastavené hodnoty zjištěné pomocí VARC. Řídicí zařízení pro přepínání odboček pracuje mnohem pomaleji než základní řídicí funkce, která působí na řídicí úhel  $\alpha$ . Spuštění jednoho přepnutí odbočky trvá několik sekund, takže tu není žádné riziko rušení mezi základní řídicí funkcí měniče a řídicím systémem pro přepínače odboček. Jeden krok určuje změnu v rozmezí 1-1,5% jmenovité hodnoty napětí na tyristoru.

Zhásecí úhel  $\gamma$  řídí přepínání odboček ve střídači, který je obvykle používán pro kontrolu napětí na stejnosměrném vedení. Hodnota napětí z děliče napětí odpovídá hodnotě  $U_{di0}$ . Díky výraznému rozdílu mezi dvěma signály hodnota v TCC stoupá nebo klesá na straně vysokého napětí. Z důvodu stupňovitého charakteru přepínání odboček, musí být řídicí systém vybaven pásmem necitlivosti. Aby se napětí dostalo zpět na referenční hodnotu a vyhnulo se parazitní frekvenci, pásmo necitlivosti by mělo mít šířku nejméně jednoho kroku přepnutí odbočky.

Řídicí proud teče do měniče, jen když je řídicí zařízení pro přepínání odboček sepnuté. Napětí v usměrňovači je řízeno pomocí napětí na konci vedení, takže se na vedení přidá úbytek napětí,  $R_d \cdot I_d$  je stejně velké, jako měřené napětí na konci vedení.



V usměrňovači se TCC normálně používá k udržení řídicího úhlu  $\alpha$ , které je udržováno co nejbližší ke jmenovité hodnotě, která je normálně  $15^\circ$ . Aby byla podmínka  $U_{dio} \cdot \cos \alpha$  konstantní v různých usměrňovačích střídavého napětí, reaguje okamžitý proud tím, že změní úhel  $\alpha$ . TCC systém v usměrňovači porovnává odchylky úhlu  $\alpha$  a referenčního signálu. Výrazné odchylky nařizují přepínači odboček změnit  $U_{dio}$ . Řízení musí obsahovat pásmo necitlivosti s krokem  $\pm 1,25\%$  od jmenovité hodnoty, odpovídající hodnotě mezi  $12^\circ$  -  $17,5^\circ$  v úhlu  $\alpha$ .

### 4.6.3 Řízení jalového výkonu (RPC)

Účelem řízení jalového výkonu (RPC) je kontrola vlastností ve střídavé síti, která je připojena k převodní stanici. Kontroluje se velikost střídavého napětí na přípojnici (U-control), nebo tok jalového výkonu ve střídavé síti (Q-control). Aby se zabránilo vysokým harmonickým frekvencím na vstupu do střídavé sítě, RPC musí zajistit, že mají filtry dostatečný rozsah. Tyto úkony jsou prováděny prostřednictvím zapínání a vypínání AC filtrů a řady bočníků.

Vlastnosti harmonických filtrů dohlíží na funkce (min. filtr) v RPC, které monitorují počet připojených filtrů. Toto číslo je v porovnání s počtem filtrů důležité pro současné operační stavy. Abychom se ujistili, že požadavky na výkon filtrů jsou splněny, je rozsah a typ filtrů závislý na provozním režimu a na úrovni stejnosměrného napětí. Aby se zabránilo přetížení filtru, tak obsahuje funkci vyšší priority (Abs Minfilt).

Aby se zabránilo přepětí, tak jsou v RPC implementovány dvě funkce nazývané Q-maximální a U-maximální. Tyto funkce odpojují AC filtry a kompenzační kondenzátory preventivně chrání před přepětím. Funkce jsou také aktivní v manuálním režimu. Q-maximální zabráňuje přepětí, například rozpojením vedení, zatímco U-maximální odpojí filtry kvůli snížení vysokého střídavého napětí.

Q-control bude v RPC přepínat blokové filtry, k udržení stabilního jalového výkonu ve střídavé síti, na přednastavené hodnotě v rámci stanovených limitů. U-control bude řídit střídavé napětí přímo pomocí RPC, a to sepnutím AC filtru.

Abs Minfilt má nejvyšší prioritu RPC funkce, neboť brání přetížení filtrů od jednotlivého filtru a rozpojených vedení. Funkce U a Q-maximální mají druhou a třetí prioritu, protože zabráňují přepětí. Čtvrtou prioritu má funkce Minfilt a řídicí funkce mají nejnižší prioritu [14].

## 4.7 Použití kabelů

### 4.7.1 Nejvýkonnější vedení



*Obr. 4-7 Místo nejvýkonnějšího vedení v Číně [16]*

Nejvýkonnější HVDC vedení na světě je v Číně, které bylo zprovozněno v roce 2013. Přenos je na napětí  $\pm 800$  kV, jmenovitý výkon 7200 MW, 7600 MW při kontinuálním přetížení a 7920 MW při dvouhodinovém přetížení. Tyristory zvládnou pracovat s rekordním DC proudem 5000 A. Vedení je dlouhé 2090 km a spojuje vodní elektrárnu v západní Číně s vysoce industrializovaným východním pobřežím [16].



*Obr. 4-8 Rozvodna Jinping-Sunan [27]*

### 4.7.2 Nejdelší vedení



*Obr. 4-9 Místo nejdelšího vedení v Brazílii [17]*

Nejdelší HVDC vedení na světě je v Brazílii a bylo zprovozněno v roce 2013. Přenáší elektrickou energii ze dvou vodních elektráren na řece Madeira do São Paula, které je vzdáleného 2375 km. Vodní elektrárny mají celkový výkon 6300 MW a napětí  $\pm 600$  kV. Dále projekt zahrnuje ještě 800 MW back-to-back stanici, která dodává elektrickou energii do severozápadní Brazílie. Rio Madeira je druhý 600 kV přenosový systém v Brazílii po projektu Itaipu, který byl vytvořen v 80. letech [18].



*Obr. 4-10 Rozvodna Rio Madeira [17]*

### 4.7.3 Nejdelší podmořské vedení



Obr. 4-11 Řez HVDC kabelem [28]

Nejdelší podmořské vedení leží na dně severního moře a spojuje Norsko a 580 km vzdálené Nizozemí. Vedení bylo zprovozněné v roce 2008 a přenáší výkon 700 MW o napětí  $\pm 450$  kV. Pro snížení nákladů a ztrát na vedení, je podmořské vedení realizováno pomocí dvou plně izolovaných kabelů, i když se jedná o monopolární vedení. Tím se může vést menší proud s menšími ztrátami, ale bude zapotřebí větší napětí [18].



Obr. 4-12 Navinutý kabel na cívku [28]



#### 4.7.4 Nejvýše položené vedení

HVDC vedení Qinghai-Tibet je nejambicióznější vedení v historii číny. Navrženo bylo koncem roku 2011 a spojuje města Xining a Geermu vzdálené 1500 km. Pracuje na střídavé napětí 750 kV. V Geermu je postavený usměrňovač, který usměrňuje napětí na stejnosměrné,  $\pm 400$  kV a pokračuje dále do hlavního města Tibetu Lhasy vzdáleného 1000 km. Projekt dále zahrnuje také dvě 750 kV rozvodny, spínací stanice a dvě  $\pm 400$  kV měnirny. Do projektu je zahrnuta i 220 kV okružní síť v Tibetu a investiční náklady se budou pohybovat okolo 2,5 miliardy dolarů. Spojení Tibetu s Čínou je zásadní pro hospodářský růst a zvýšení spolehlivosti tibetské rozvodné sítě.

Zvláštností tohoto stejnosměrného vedení je, že patří mezi nejvýše položené nadzemní vedení na světě a také je nejdelší HVDC vedení v takové výšce. Vedení je v průměru ve výšce 4500 m.n.m, s nejvyšším bodem 5300 m. Kromě stavební výzvy v tibetské náhorní plošině, se projektanti museli zabývat extrémním chladem, trvale zmrzlou zemí, vysokým stupněm UV záření a křehkým ekosystémem, který není zvyklý na takové věci, jako je koróna a elektromagnetické pole. Velmi náročné bylo také navrhnutí izolace, které by splňovalo požadavky na ochranu přírody a vodičů. Projektanti zvolili silikonové kompozitní izolátory, protože jsou odolné proti zvýšenému UV záření a častému chladu. Pro toto vedení je použit speciálně upravený silikonový kaučuk, který má odolnost v tahu přes 20 kN/m, oproti klasickému 7 kN/m a tím odolá povětrnostním podmínkám. Je hydrofobní a tím lépe odolává znečištění. Nevýhodou je, že při nízké teplotě  $-2$  až  $-10$  °C se snižuje hydrofobnost materiálu. Voda se na nich mění na led až při  $-3$  °C. K překonání tohoto rizika se používá třech různých velikostí stříšek izolátoru: malé, střední a velké. Malá stříška se vkládá mezi střední a velkou stříškou [19].



Obr. 4-13 První stožár v Geermu [19]

## 5. SUPRAVODIVÉ VEDENÍ

### 5.1 Výzkum

Supravodivost je jev, kdy je určitá látka vystavená nízkým teplotám a tím vede proud vodičem, který je bez odporu. Nizozemský vědec (Heike Kamerlingh Onnes) objevil supravodivost v roce 1911, když rtuť podchladił pomocí tekutého hélia na teplotu kolem 4 K (-269 °C). Tím dokázal, že rtuť při tak nízké teplotě nemá žádný měřitelný odpor. Nicméně v této době nebyla tato realizace přijatelná, protože byla příliš vysoká spotřeba energie na ochlazení tekutého hélia a dlouhodobé udržení extrémně nízké teploty pro vznik supravodivosti. Až do roku 1986, byli vědci přesvědčeni, že teplota pro supravodivost musí být pod 20 K (-253 °C). Toho roku vědci v Zurichu (Georg Bednorz a Alex Müller) objevili keramickou slitinu, která se skládá z baria, lanthanu, mědi a kyslíku. Tento materiál dokáže být supravodivý při teplotách kolem 35 K (-238 °C). Tím vytvořili první "vysokoteplotní" supravodič (HTS).

Tímto objevem se po celé planetě rozjeli stovky laboratoří testující keramický supravodič ve snaze dosáhnout vyšší kritické teploty. Pár měsíců na to vyzkoumali v USA slitinu, změnou lanthanu za yttrium, která byla supravodivá při teplotě okolo 90 K (-183 °C, YBCO). Tím se začal používat, jako chladicí médium, levnější a energeticky méně náročný tekutý dusík místo dražšího tekutého hélia. V roce 1988 Allen Herman vyzkoumal sloučeninu obsahující thallium a vápník, a tím se mu podařilo zvednout kritickou teplotu až na teplotu 120 K (-153 °C) [20], [21].

### 5.2 Supravodivost při vysokém tlaku

Sirovodík, sloučenina vodíku a síry, vede elektrickou energii s nulovým odporem už při teplotě 203 K (-70 °C). První zmínky o výzkumu byly 2. prosince 2014. Tento objev by mohl vést k nalezení supravodiče, který by pracoval při pokojové teplotě. Supravodič pracující při pokojové teplotě, by umožňoval výrobu a přenos elektrické energie mnohem účinněji. To by poskytlo velký nárůst zařízení, které spotřebují velké množství proudu např. magnetická rezonance.

Na výzkumu pracovali Mikhail Eremets a Alexand Drozdov v německém ústavu Maxe Plancka v Mainz. Zjistili, že když je sirovodík vystaven extrémnímu tlaku 150 GPa, tak ho stačí ochladit jen pod teplotu 203 K (-70 °C). Sirovodík začne vykazovat známky supravodivosti, jako nulový odpor a Meissnerův jev. Meissnerův jev nastane, když je supravodivý materiál umístěn do vnějšího magnetického pole, siločáry nebudou procházet vodičem, ale kolem něj. Tímto objevem se mohou začít testovat i jiné sloučeniny vodíku pro supravodivost. Mohou to být sloučeniny vodíku s platinou, draslíkem, selenem nebo tellurem místo síry.

Vodič je zajímavý tím, že se na něj nepoužily exotické materiály, jako jsou sloučeniny obsahující měď (kuprity). Ty drželi rekord v nejvyšší kritické teplotě 133 K (-140 °C) při okolním tlaku a 164 K (-109 °C) ve vysokém tlaku. Fan Zhang z Dalasu a Yugui Yao z Číny předpověděli, že kdyby se v sirovodíku nahradilo 7,5% atomů síry za fosfor a tlak by se zvedl na

250 GPa, tak by se kritická teplota supravodiče mohla zvednout na teplotu 280 K (7 °C), což je teplota nad bodem mrazu vody [22].

Tab. 5-1 Kritické teploty supravodičů

Material	Kritická teplota [K]	Kritická teplota [°C]	Třída
Rtuť	4,2	-268,8	Kovový nízkoteplotní supravodič
Bod varu hélia	4,2	-268,8	
Niob	9,2	-263,8	Kovový nízkoteplotní supravodič
Niob-Titan	10	-263	
Niob-Cín	18	-255	
Bod varu vodíku	20	-253	Supravodič na bázi železa
LaFeAs(O,F)	26	-247	
CeFeAs(O,F)	41	-232	
SmFeAs(O,F)	55	-218	
Bod varu dusíku	77	-196	Supravodič na bázi mědi
YBCO	93	-180	
BSCCO	110	-163	
HBCCO	133	-140	
Sirovodík	203	-70	Supravodič na bázi vodíku při tlaku 150 GPa

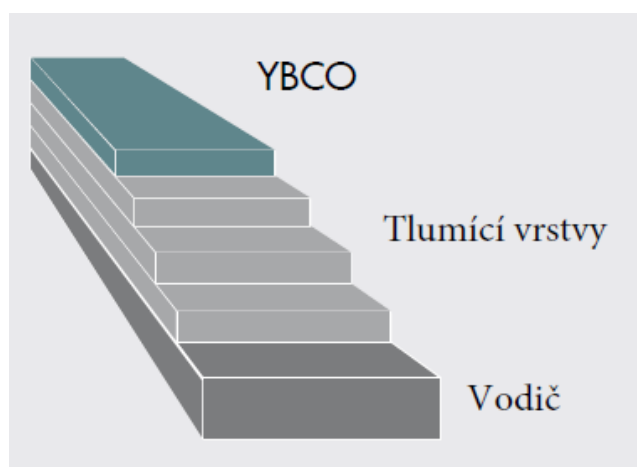
### 5.3 Výhody supravodivého vedení

- Vyšší přenášený výkon
- Nižší napětí
- Vyšší účinnost přenosu
- Dlouhá životnost
- Nízké ztráty
- Šetrný k životnímu prostředí
- Nízké elektromagnetické pole [23]

## 5.4 Kably

### 5.4.1 YBCO

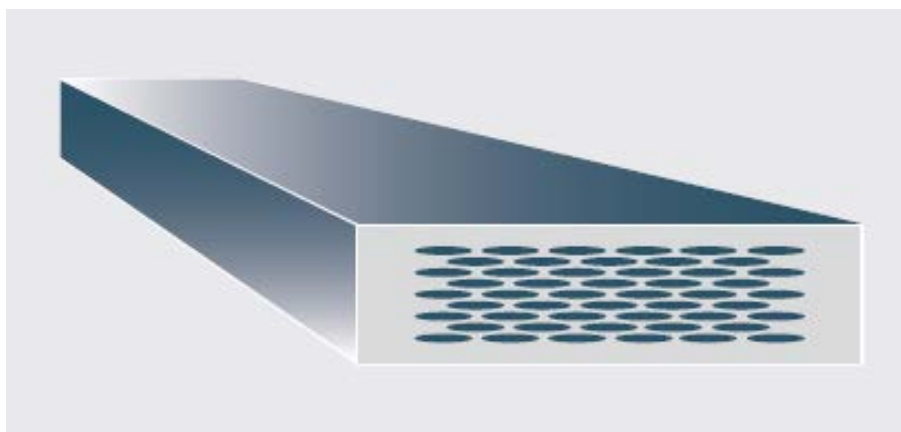
Kabel je sloučenina yttria, baria, mědi a kyslíku. Tento vodič je několikavrstvý. Proudová hustota se blíží k  $100 \text{ A/mm}^2$  při teplotě  $77 \text{ K}$  ( $-196 \text{ }^\circ\text{C}$ ) v délce stovek metrů. Kably se rychle vyvíjí a tím se zvětšuje i proudová hustota a dostupná délka. V porovnání s kabelem BSCCO má kabel YBCO lepší porovnání cena/účinnost. Počet tlumících vrstev a volba materiálu závisí na výrobci.



Obr. 5-1 Struktura vodiče YBCO [23]

### 5.4.2 BSCCO

Kabel je sloučenina bizmutu, stroncia, vápníku, mědi a kyslíku. Má vícevláknovitou strukturu ve stříbrném obalu, které nereaguje s keramikou. Může být dlouhý několik kilometrů. Proudová hustota kabelu je  $100 \text{ A/mm}^2$  při běžné teplotě  $77 \text{ K}$  ( $-196 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Jeho kritická teplota je  $110 \text{ K}$  ( $-163 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

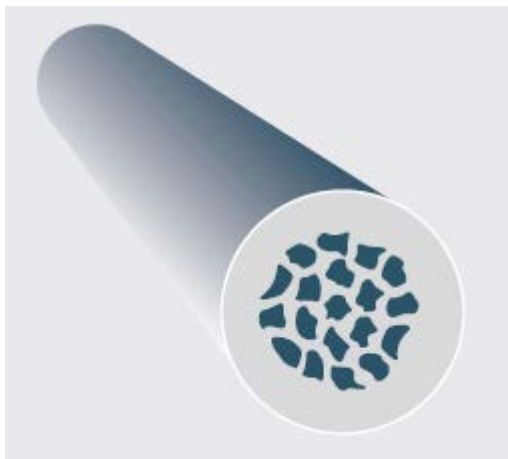


Obr. 5-2 Struktura vodiče BSCCO [23]



### 5.4.3 MgB<sub>2</sub>

Kabel je sloučenina hořčíku a boru. Má vícevláknovitou strukturu v plášti. Může být dlouhý několik kilometrů. Proudová hustota kabelu je 1000 A/mm<sup>2</sup> při teplotě 20 K (-253 °C). Má dobrý poměr účinnost/cena, a proto se hodně využívá pro vysoko proudové sítě [23].

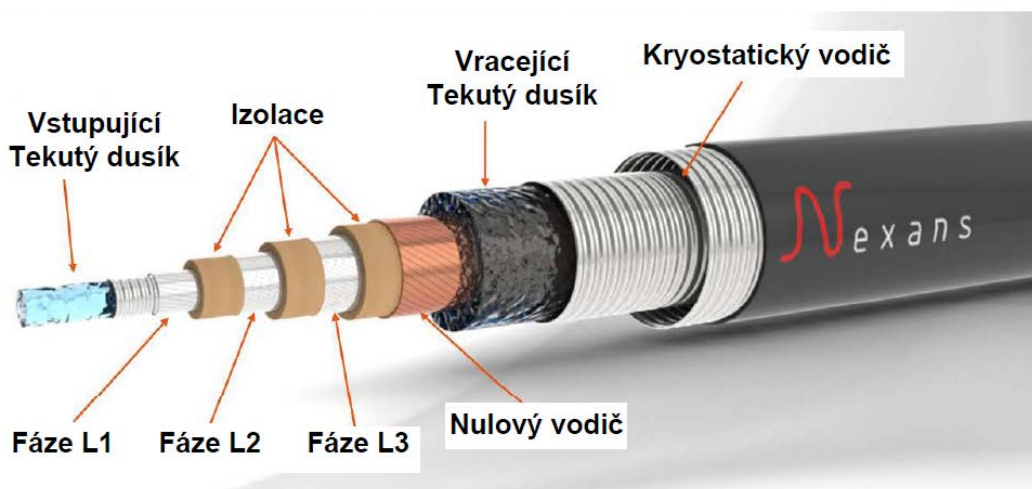


Obr. 5-3 Struktura vodiče MgB<sub>2</sub> [23]

## 5.5 Využití supravodivosti

### 5.5.1 Nejdelší kabel

V roce 2014 byl zprovozněn, v německém městě Essen, zatím nejdelší supravodivý kabel o délce 1 km a teplotě -200 °C. Supravodivý kabel o napětí 10 kV nahradí měděný kabel o napětí 110 kV a měl by přenášet výkon 40 MW. Kabel je velmi efektivní, prostorově úsporný, přenáší pět krát vyšší výkon a je téměř beze ztrát. Tím se zjednoduší systém městských sítí a sníží se počet trafostanic, o 40 %, které zabírají velké plochy.



Obr. 5-4 Supravodivý kabel [12]

Vývoj vysokoteplotního supravodivého kabelu trval 30 let, než byl připraven pro komerční provoz. Za tu dobu se vylepšil materiál, ze kterého jsou kabely vyráběny, aby měly větší mechanickou odolnost a menší ztráty pod zatížením. Projekt ukázal, že jsou kabely připraveny k použití s vysokou spolehlivostí [13].

Do roku 2019 firma Tennet plánuje testování dvou až čtyřkilometrového úseku vedení, což bude nejdelší úsek na světě. Vedení bude připojeno na napětí 150 kV. Ochranné pásmo u supravodivých kabelů je 3 m. Zatím není možné používat delší vedení, kvůli množství použitého chladicího média a ceně vedení, která je třikrát vyšší než u běžných kabelů [9].

### 5.5.2 Nejvýkonnější kabel

Furukawa Electric je japonská firma, která vyvinula, v projektu NEDO, supravodivý kabel s přenosem energie o napětí 275 kV a 1,5 GVA, což je nejvyšší dosažená úroveň přenosu energie na světě. Kabel má průměr 15 cm a ztráty 0,8 W/m. K tomu také vyvinuly terminál nadzemní přípojky a průběžnou přípojku pro připojení k elektrickému zařízení. Demonstrační test byl prováděn v Shenyangu v Číně. Kabel měl délku 30 m a byl měsíc zatěžován napětím 200 kV a proudem 3 kA a poté byl připojen na napětí 310 kV. Zrychlený test byl ekvivalentem třiceti let a úspěšně potvrdil spolehlivost kabelů a přípojek. Vývoj kabelů se zaměřuje hlavně na kabely o napětí 66 kV. Nicméně se poptávka v zahraničí zvýšila na kabely o větším výkonu a napětí. Firma se bude dále zabývat rozšířením supravodivosti na transformátory a další elektrické zařízení [24].



Obr. 5-5 Testování kabelu [24]

### 5.5.3 Maglev

Maglev využívá pro levitování magnetickou sílu. Běžné magnety mají omezenou magnetickou sílu, a proto se používají supravodivé cívky. Přes supravodivé cívky prochází trvalý proud kolem 700 kA, který vytváří silné magnetické pole o velikosti téměř 5 T. Díky dvěma typům cívek, umístěných v příčkách podél kolejí, umožňuje magnetické pole levitaci a pohon vlaku. Pro zrychlení Maglevu se zvýší proud v pohonných cívkách. Pro zpomalení se otočí směr proudu. Levitační cívky umožňují vlaku levitovat. Cívky jsou zkratovány a nepotřebují žádný zdroj energie. Při pohybu vlaku se v cívkách indukuje proud. Proud se zvětšuje s rychlostí vlaku, proto se v cívkách indukuje proud, až od rychlosti přes 100 km/h. Při nízké rychlosti je vlak vybaven koly, které se vysunou z vozů, stejně jako v letadlech. V roce 2015 udělal Maglev rychlostní rekord za nejrychlejší vlak a to s rychlostí 603 km/h [25].



Obr. 5-6 Maglev [25]

### 5.5.4 Potenciální využití

Supravodivost je slibná na poli mikroelektroniky. Plošné spoje vlivem odporu kovových cestiček generují teplo a prodlužují dobu nabíjení kondenzátorů. Kovové cestičky navíc zabraňují miniaturizaci a zrychlování počítačových čipů. Využitím supravodivých cestiček by se mohly více nahustit k sobě a přenášet rychleji informace.

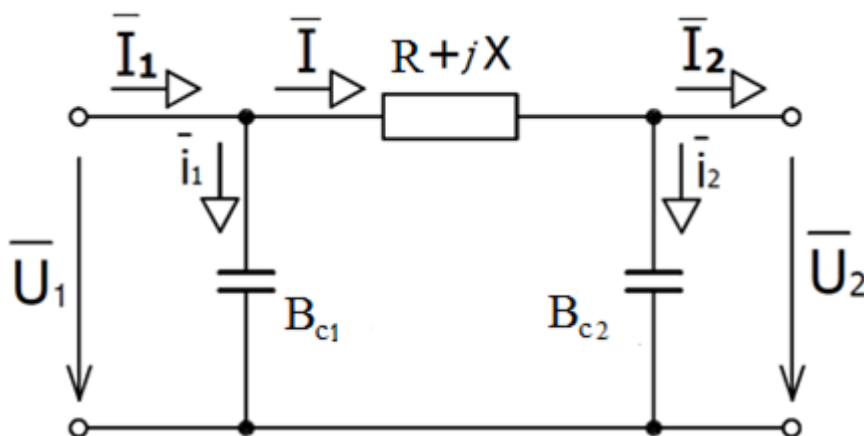
Supravodivé magnety jsou již klíčovou součástí několika technologií. Magnetická rezonance hraje stále větší roli v diagnostické medicíně. Intenzivní magnetické pole, které je za potřebí pro zobrazování, je perfektní pro aplikaci supravodičů [26].

## 6. LABORATORNÍ MODELÝ

### 6.1 Optimalizace modelů

V bakalářské práci bylo za úkol optimalizovat parametry používaných laboratorních modelů tak, aby splňovaly reálné parametry venkovního vedení. V laboratoři byly změřeny parametry sedmi laboratorních modelů, označené 1 až 8. Laboratorní model číslo 4 nebyl změřen z důvodu, že nebyl nedimenzován pro měření zkratových proudů. Model číslo 7 je v zapojení Steinmetzova článku, a proto u něj byly naměřeny dva odpory. Modely vedení byly změřeny pomocí zapojení do  $\pi$ -článku, jak je znázorněno na Obr. 6-1. Naměřené hodnoty modelů jsou vypsány do Tab. 6-1. Z naměřených hodnot byla následně vypočtena indukčnost modelu.

V bakalářské práci jsou příklady výpočtu počítány pro první model. Komplexní čísla jsou v tabulkách značena tučně a v rovnicích jsou označeny čarou nad příslušnou veličinou.



Obr. 6-1 Schéma laboratorního modelu

Tab. 6-1 Tabulka naměřených modelových hodnot

Model	1	2	3	5	6	7	8
$I_m$ [A]	0,52	0,52	0,82	0,52	4,03	1,20	0,84
$U_m$ [V]	57,8	57,8	56,9	57,8	56,5	56,8	57,8
$C_1$ [F]	2,034E-06	2,050E-06	1,015E-06	2,040E-06	1,019E-06	1,041E-06	4,560E-07
$C_2$ [F]	2,140E-06	2,040E-06	1,029E-06	2,122E-06	1,086E-06	1,280E-06	5,520E-07
$R_1$ [ $\Omega$ ]	3,7	3,8	1,8	3,8	2,0	1,2	1,9
$R_2$ [ $\Omega$ ]						1,3	
$Z_m$ [ $\Omega$ ]	111,154	111,154	69,390	111,154	14,019	47,333	68,809
$X_m$ [ $\Omega$ ]	111,092	111,089	69,367	111,089	13,877	47,267	68,783
$L_m$ [H]	0,3536	0,3536	0,2208	0,3536	0,0442	0,1505	0,2189

Pro výpočet indukčnosti byla vypočítána velikost impedance:

$$Z_m = \frac{U_m}{I_m} = \frac{57,8}{0,52} = 111,154 \, \Omega \quad (6-1)$$

Z vypočtené velikosti impedance a změřeného odporu modelu byla vypočítána reaktance:

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_1^2} = \sqrt{111,154^2 - 3,7^2} = 111,092 \, \Omega \quad (6-2)$$

Z vypočtené induktivní reaktance se stanovila indukčnost:

$$L_m = \frac{X_m}{2\pi * f} = \frac{111,092}{2\pi * 50} = 0,3536 \, H \quad (6-3)$$

Modelové hodnoty z Tab. 6-1 byly přepočítány na reálné hodnoty a zapsané do Tab. 6-2. Hodnoty byly přepočítány pomocí měřitek  $m_u$ ,  $m_i$  a  $m_z$ . Měřítka  $m_u$  bylo vypočteno z napájecího napětí, které se pohybuje kolem hodnoty 57 V, podělené fázovým napětím skutečného vedení. Měřítka  $m_i$  je zvolená hodnota, která byla zvolena pro jednotlivé modely, aby reálný proud nepřesáhl 700 A, z důvodu zatížení vodičů a rezistorů ztrátovým výkonem. Z těchto měřitek bylo spočítáno měřítka  $m_z$  a následně ostatní parametry modelů.

Tab. 6-2 Tabulka vypočtených reálných hodnot

Model	1	2	3	5	6	7	8
$m_u$	9,00E-04	9,00E-04	9,00E-04	9,00E-04	9,00E-04	4,40E-04	4,40E-04
$m_i$	1,00E-03	1,00E-03	1,60E-03	1,00E-03	6,00E-03	1,76E-03	1,20E-03
$m_z$	0,90	0,90	0,563	0,90	0,15	0,25	0,367
$I$ [A]	520,00	520,00	512,50	520,00	671,67	681,82	700,00
$R$ [ $\Omega$ ]	4,1	4,2	3,2	4,2	13,3	10,0	5,2
$L$ [H]	0,3929	0,3929	0,3925	0,3929	0,2945	0,6018	0,5971
$X$ [ $\Omega$ ]	123,4	123,4	123,3	123,4	92,5	189,1	187,6
$C$ [F]	4,638E-06	4,544E-06	3,634E-06	4,624E-06	1,400E-05	9,29E-06	2,749E-06

Měřítka impedance bylo vypočítáno podílem měřítka napětí a proudu:

$$m_z = \frac{m_u}{m_i} = \frac{9 * 10^{-4}}{1 * 10^{-3}} = 0,9 \quad (6-4)$$

Z měřítka proudu byl vypočítán skutečný proud:

$$I = \frac{I_m}{m_i} = \frac{0,52}{1 * 10^{-3}} = 520 \, A \quad (6-5)$$

Pomocí měřítka impedance byl vypočítán

- odpor:

$$R = \frac{R_1}{m_z} = \frac{3,7}{0,9} = 4,1 \, \Omega \quad (6-6)$$

- indukčnost:

$$L = \frac{L_m}{m_z} = \frac{0,3536}{0,9} = 0,3929 \, H \quad (6-7)$$

- reaktance:

$$X = \frac{X_m}{m_z} = \frac{111,092}{0,9} = 123,4 \, \Omega \quad (6-8)$$

- kapacita:

$$C = \frac{C_1 + C_2}{m_z} = \frac{2,034 * 10^{-6} + 2,140 * 10^{-6}}{0,9} = 4,638 * 10^{-6} \, F \quad (6-9)$$

Reálná délka vedení byla spočítána pomocí přepočtené reaktance z Tab. 6-2 a vybrané hodnotě reaktance reálného vodiče na jednotku délky.  $\Pi$ -článek je přesný pro délky vedení do 400 km. Z délky a odporu vodiče byl vypočítán reálný odpor vedení. Ten byl následně přepočítán zpět na odpor modelu a byl od něj odečten odpor, který byl na modelu naměřen v Tab. 6-1. Tak byl určen odpor rezistoru, který je třeba zapojit do obvodu jednotlivých modelů.

Tab. 6-3 Tabulka vypočtených přídavných odporů

Model	1	2	3	5	6	7	8
$l$ [km]	337,2	337,2	320,0	371,2	223,3	430,5	427,1
$R$ [ $\Omega$ ]	14,2	14,2	20,8	16,1	34,8	37,5	37,2
$R_m$ [ $\Omega$ ]	12,7	12,7	11,7	14,5	5,2	9,4	13,6
$R_p$ [ $\Omega$ ]	9,0	8,9	9,9	10,7	3,2	6,9	11,7

Uvedené parametry jsou použity z tabulek v literatuře [30].

Pro první laboratorní model vedení byly vybrány parametry pro vedení 110 kV a vodiče AlFe 670/8 mm<sup>2</sup>.  $R_k = 0,042 \Omega/\text{km}$ ,  $X_k = 0,3661 \Omega/\text{km}$ .

První byla vypočítána délka vedení:

$$l = \frac{X}{X_k} = \frac{123,4}{0,3661} = 337,2 \text{ km} \quad (6-10)$$

Z délky byl spočítán reálný odpor:

$$R = l * R_k = 337,2 * 0,042 = 14,2 \Omega \quad (6-11)$$

Reálný odpor byl přepočítán na celkový odpor přípravku:

$$R_m = R * m_z = 14,2 * 0,9 = 12,7 \Omega \quad (6-12)$$

A odečtením byl získán přídavný odpor:

$$R_p = R_m - R_1 = 12,7 - 3,7 = 9 \Omega \quad (6-13)$$

Pro druhý laboratorní model vedení byly vybrány parametry pro vedení 110 kV a vodiče AlFe 670/8 mm<sup>2</sup>.  $R_k = 0,042 \Omega/\text{km}$ ,  $X_k = 0,3661 \Omega/\text{km}$ .

Pro třetí laboratorní model vedení byly vybrány parametry pro vedení 110 kV a vodiče AlFe 450/6 mm<sup>2</sup>.  $R_k = 0,065 \Omega/\text{km}$ ,  $X_k = 0,3854 \Omega/\text{km}$ .

Pro pátý laboratorní model vedení byly vybrány parametry pro vedení 220 kV a vodiče AlFe 2x350/4 mm<sup>2</sup>.  $R_k = 0,0435 \Omega/\text{km}$ ,  $X_k = 0,3325 \Omega/\text{km}$ .

Pro šestý laboratorní model vedení byly vybrány parametry pro vedení 110 kV a vodiče AlFe 185/6 mm<sup>2</sup>.  $R_k = 0,156 \Omega/\text{km}$ ,  $X_k = 0,4143 \Omega/\text{km}$ .

Pro sedmý laboratorní model vedení byly vybrány parametry pro vedení 220 kV a vodiče AlFe 350/4 mm<sup>2</sup>.  $R_k = 0,087 \Omega/\text{km}$ ,  $X_k = 0,4392 \Omega/\text{km}$ .

Pro osmý laboratorní model vedení byly vybrány parametry pro vedení 220 kV a vodiče AlFe 350/4 mm<sup>2</sup>.  $R_k = 0,087 \Omega/\text{km}$ ,  $X_k = 0,4392 \Omega/\text{km}$ .

Po přepočtení odporů byl každý model změřen znovu s vypočteným odporem zapojeným do příčné větve  $\pi$ -člátku. Modely byly změřeny v zapojení naprázdno a nakrátko. U každého měření bylo nastaveno přibližně stejně velké napájecí napětí. Výsledky měření jsou uvedeny do Tab. 6-4.

Tab. 6-4 Tabulka naměřených hodnot s přidavným odporem

Model	1	2	3	5	6	7	8
$I_0$ [mA]	77	76	38	77	36	40	18
$U_0$ [V]	57,64	57,79	57,49	57,71	56,18	56,15	55,95
$P_0$ [mW]	50	51	26	54	29	47	14
$I_k$ [mA]	482	480	792	478	3782	1140	786
$U_k$ [V]	57,55	57,80	57,48	57,71	56,18	56,21	56,27
$P_k$ [W]	4,12	4,16	9,52	4,62	75,30	15,14	9,73

Pomocí měřítek  $m_u$ ,  $m_i$  a  $m_z$  byly přepočítány naměřené hodnoty z Tab. 6-4 na reálné parametry. Z přepočtených hodnot byla poté spočítána impedance naprázdno a nakrátko.

Tab. 6-5 Tabulka přepočtených hodnot s přidavným odporem

Model	1	2	3	5
$I_{10}$ [A]	77,00	76,00	23,75	77,00
$U_{10}$ [V]	64044	64211	63878	64122
$P_{10}$ [W]	55556	56667	18056	60000
$Z_{10}$ [ $\Omega$ ]	831,7 $\angle$ -89,35°	844,9 $\angle$ -89,33°	2689,6 $\angle$ -89,32°	832,8 $\angle$ -89,3°
$I_{1k}$ [A]	482,00	480,00	495,00	478,00
$U_{1k}$ [V]	63944	64222	63867	64122
$P_{1k}$ [kW]	4577,78	4622,22	6611,11	5133,33
$Z_{1k}$ [ $\Omega$ ]	132,7 $\angle$ 81,46°	133,8 $\angle$ 81,38°	129 $\angle$ 77,93°	134,1 $\angle$ 80,36°
Model	6	7	8	
$I_{10}$ [A]	6,00	22,73	15,00	
$U_{10}$ [V]	62422	127614	127159	
$P_{10}$ [W]	5370	60692	26515	
$Z_{10}$ [ $\Omega$ ]	10403 $\angle$ -89,18°	5614,3 $\angle$ -88,8°	8477,3 $\angle$ -89,2°	
$I_{1k}$ [A]	630,33	647,73	655,00	
$U_{1k}$ [V]	62422	127750	127886	
$P_{1k}$ [kW]	13944,44	19550,62	18428,03	
$Z_{1k}$ [ $\Omega$ ]	99,03 $\angle$ 69,24°	197,2 $\angle$ 76,33°	195,2 $\angle$ 77,29°	

Přepočítané parametry pro měření naprázdno:

$$I_{10} = \frac{I_0}{m_i} = \frac{0,077}{1 * 10^{-3}} = 77 \text{ A} \quad (6-14)$$

$$U_{10} = \frac{U_0}{m_u} = \frac{57,64}{9 * 10^{-4}} = 64044 \text{ V} \quad (6-15)$$

$$P_{10} = \frac{P_0}{m_p} = \frac{0,05}{9 * 10^{-7}} = 55556 \text{ W} \quad (6-16)$$

Z přepočtených parametrů byla vypočítána impedance naprázdno:

$$\bar{Z}_{10} = \frac{U_{10}}{I_{10}} \angle -\arccos \frac{P_{10}}{U_{10} * I_{10}} = \frac{64044}{77} \angle -\arccos \frac{55556}{64044 * 77} = 831,7 \angle -89,35^\circ \Omega \quad (6-17)$$

Přepočítané parametry pro měření nakrátko:

$$I_{1k} = \frac{I_k}{m_i} = \frac{0,482}{1 * 10^{-3}} = 482 \text{ A} \quad (6-18)$$

$$U_{1k} = \frac{U_k}{m_u} = \frac{57,55}{9 * 10^{-4}} = 63944 \text{ V} \quad (6-19)$$

$$P_{1k} = \frac{P_k}{m_p} = \frac{4,12}{9 * 10^{-7}} = 4577,78 \text{ kW} \quad (6-20)$$

Z přepočtených parametrů byla vypočítána impedance nakrátko:

$$\bar{Z}_{1k} = \frac{U_{1k}}{I_{1k}} \angle \arccos \frac{P_{1k}}{U_{1k} * I_{1k}} = \frac{63944}{482} \angle \arccos \frac{4577780}{63944 * 482} = 132,7 \angle 81,46^\circ \Omega \quad (6-21)$$

Pro výpočet Blondelových konstant pomocí měrných hodnot byla vypočítána impedance a admitance jednotlivých modelů. V Tab. 6-6 jsou hodnoty pro modely před přidáním odporu a v Tab. 6-7 jsou hodnoty pro modely s přidávným odporem.

Tab. 6-6 Tabulka impedance a admitance bez přidávného odporu

Model	1	2	3	5	6	7	8
<b>Z</b> [ $\Omega$ ]	4,1+j123,4	4,2+j123,4	3,2+j123,3	4,2+j123,4	13,3+j92,5	10+j189,1	5,2+j187,6
<b>Y</b> [S]	j1,457E-03	j1,428E-03	j1,142E-03	j1,453E-03	j4,398E-03	j2,917E-03	j8,637E-04

Tab. 6-7 Tabulka impedance a admitance s přidávným odporem

Model	1	2	3	5	6	7	8
<b>Z</b> [ $\Omega$ ]	14,2+j123,4	14,2+j123,4	20,8+j123,3	16,1+j123,4	34,8+j92,5	37,5+j189,1	37,2+j187,6
<b>Y</b> [S]	j1,457E-03	j1,428E-03	j1,142E-03	j1,453E-03	j4,398E-03	j2,917E-03	j8,637E-04

Impedance byla vypočítána z odporu a reaktance vedení:

$$\bar{Z} = R_k * l + jX_k * l = 0,042 * 337,2 + j0,3661 * 337,2 = 14,2 + j123,4 \Omega \quad (6-22)$$

U admitance byla zanedbána konduktance G a počítalo se pouze s kapacitní susceptancí:

$$\bar{Y} = j\omega * C = j * 2\pi * 50 * 4,638 * 10^{-6} = (j1,457 * 10^{-3}) \text{ S} \quad (6-23)$$

Příklady výpočtu pro Tab. 6-9:

$$\bar{A} = \bar{D} = \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{\bar{Z}_{1k}}{\bar{Z}_{10}}}} = \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{132,7 \angle 81,46}{831,7 \angle -89,35}}} = 0,929 \angle 0,63^\circ \quad (6-24)$$

$$\bar{B} = \bar{A} * \bar{Z}_{1k} = 0,929 \angle 0,63 * 132,7 \angle 81,46 = 123,28 \angle 82,09^\circ \quad (6-25)$$



$$\bar{C} = \frac{\bar{A}}{\bar{Z}_{10}} = \frac{0,929 \angle 0,63}{831,7 \angle -89,35} = 1,12 * 10^{-3} \angle 89,98^\circ \quad (6-26)$$

$$\bar{A}_p = \bar{D}_p = 1 + \frac{\bar{Z} * \bar{Y}}{2} = 1 + \frac{(14,2 + j123,4) * (j1,457 * 10^{-3})}{2} = 0,91 \angle 0,65^\circ \quad (6-27)$$

$$\bar{B}_p = \bar{Z} = 14,2 + j123,4 = 124,21 \angle 83,44^\circ \quad (6-28)$$

$$\bar{C}_p = \bar{Y} * \left(1 + \frac{\bar{Z} * \bar{Y}}{2}\right) = (j1,457 * 10^{-3}) * 0,91 \angle 0,65 = 1,33 * 10^{-3} \angle 90,65^\circ \quad (6-29)$$

V Tab. 6-8 jsou spočítány Blondelovy konstanty pro laboratorní modely bez přidaného odporu z Tab. 6-6.

Tab. 6-8 Tabulka Blondelových konstant bez přídavného odporu

Model	1	2	3	5
$A_p = D_p$	0,91 $\angle$ 0,19°	0,91 $\angle$ 0,19°	0,93 $\angle$ 0,11°	0,91 $\angle$ 0,19°
$B_p$	123,47 $\angle$ 88,1°	123,47 $\angle$ 88,05°	123,34 $\angle$ 88,51°	123,47 $\angle$ 88,05°
$C_p$	1,33E-03 $\angle$ 90,19°	1,3E-03 $\angle$ 90,19°	1,06E-03 $\angle$ 90,11°	1,32E-03 $\angle$ 90,19°
Model	6	7	8	
$A_p = D_p$	0,797 $\angle$ 2,1°	0,72 $\angle$ 1,15°	0,92 $\angle$ 0,14°	
$B_p$	93,45 $\angle$ 81,82°	189,36 $\angle$ 86,97°	187,67 $\angle$ 88,41°	
$C_p$	3,51E-03 $\angle$ 92,1°	2,1E-03 $\angle$ 91,15°	7,95E-04 $\angle$ 90,14°	

Z impedancí v Tab. 6-5 jsou spočítány všechny Blondelovy konstanty. Blondelovy konstanty z měrných hodnot jsou spočítány z impedancí a admitancí z Tab. 6-7.

Tab. 6-9 Tabulka vypočtených Blondelových konstant

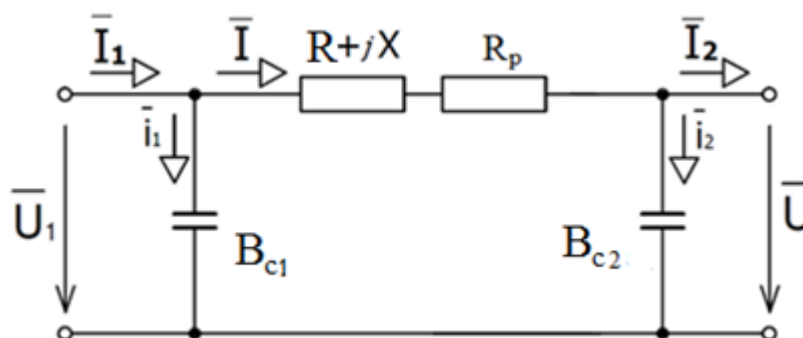
Model	1	2	3	5
$A = D$	0,929 $\angle$ 0,63°	0,93 $\angle$ 0,63°	0,977 $\angle$ 0,29°	0,945 $\angle$ 0,71°
$B$	123,28 $\angle$ 82,09°	124,4 $\angle$ 82,01°	126,03 $\angle$ 78,22°	126,7 $\angle$ 81,07°
$C$	1,12E-03 $\angle$ 89,98°	1,1E-03 $\angle$ 89,96°	3,63E-04 $\angle$ 89,61°	1,13E-03 $\angle$ 90,01°
$A_p = D_p$	0,91 $\angle$ 0,65°	0,91 $\angle$ 0,64°	0,93 $\angle$ 0,73°	0,91 $\angle$ 0,74°
$B_p$	124,21 $\angle$ 83,44°	124,21 $\angle$ 83,44°	125,04 $\angle$ 80,42°	124,45 $\angle$ 82,57°
$C_p$	1,33E-03 $\angle$ 90,65°	1,3E-03 $\angle$ 90,64°	1,06E-03 $\angle$ 90,73°	1,32E-03 $\angle$ 90,74°
Model	6	7	8	
$A = D$	0,996 $\angle$ 0,1°	0,983 $\angle$ 0,25°	0,989 $\angle$ 0,15°	
$B$	98,63 $\angle$ 69,34°	193,85 $\angle$ 76,48°	193,05 $\angle$ 77,44°	
$C$	9,57E-05 $\angle$ 89,28°	1,75E-04 $\angle$ 89,05°	1,17E-04 $\angle$ 89,35°	
$A_p = D_p$	0,998 $\angle$ 0,04°	0,72 $\angle$ 1,15°	0,92 $\angle$ 1°	
$B_p$	98,83 $\angle$ 69,38°	189,8 $\angle$ 78,61°	191,25 $\angle$ 78,41°	
$C_p$	4,39E-03 $\angle$ 90,04°	2,1E-03 $\angle$ 91,15°	7,95E-04 $\angle$ 91°	

Porovnáním Tab. 6-8 a Tab. 6-9 je vidět rozdíl po přidání přídavného odporu. Přídavný odpor byl upraven podle parametrů naměřených na modelu.

Tab. 6-10 Přídavné rezistory pro modely

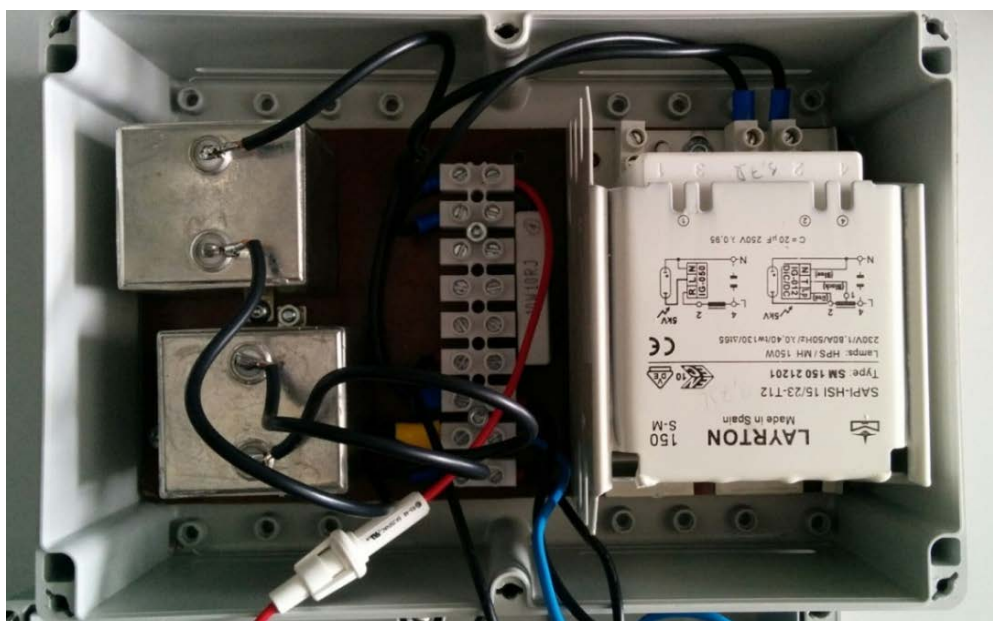
Model	1	2	3	5
Rezistor	RD 10R 10W	RD 10R 10W	RD 10R 10W	2 * RD 5R6 10W
$R [\Omega]$	10	10	10	5,6
$P_z [W]$	10	10	10	10
Model	6	6	7	8
Rezistor	2 * RD 1R2 20W	RD 1R 20W	RD 6R8 20W	RD 12R 10W
$R [\Omega]$	1,2	1	6,8	12
$P_z [W]$	20	20	20	10

Velikost odporu přídavných rezistorů, pro laboratorní model, byl zvolen pro nejbližší hodnotu odporu reálného rezistoru.



Obr. 6-2 Schéma laboratorního modelu

Přídavné rezistory byly zapojeny do jednotlivých laboratorních modelů. Rezistory byly připojeny sériově s cívkou přímo na svorkovnici, jak je patrné na Obr. 6-2. Na svorkovnici se nebudou v budoucnu připojovat žádné součástky, a proto zde rezistory nebudou překážet. Po sestavení všech modelů byly modely opět změřeny a hodnoty zapsány do Tab. 6-11.



Obr. 6-3 Laboratorní model s přidaným rezistorem

Tab. 6-11 Tabulka naměřených hodnot se skutečným rezistorem

Přípravek	1	2	3	5
$I_o$ [mA]	80	80	40	80
$U_o$ [V]	57	57	57	57
$P_o$ [mW]	50	50	100	220
$I_k$ [mA]	480	470	790	470
$U_k$ [V]	57	57	57	57
$P_k$ [W]	3,52	3,37	7,56	3,77
Přípravek	6	7	8	
$I_o$ [mA]	40	40	20	
$U_o$ [V]	57	57	57	
$P_o$ [mW]	100	150	50	
$I_k$ [mA]	3780	1160	800	
$U_k$ [V]	57	57	57	
$P_k$ [W]	79,40	12,90	8,68	

Pomocí měřitek  $m_u$ ,  $m_i$  a  $m_z$  byly přepočítány naměřené hodnoty z Tab. 6-11 na reálné parametry podle rovnic pro měření naprázdno (6-14), (6-15), (6-16) a pro měření nakrátko (6-18), (6-19), (6-20). Z přepočtených hodnot byla poté spočítána impedance naprázdno a nakrátko podle rovnic (6-17) a (6-21).

Tab. 6-12 Tabulka vypočtených hodnot se skutečným rezistorem

Přípravek	1	2	3	5
$I_{10}$ [A]	80,00	80,00	25,00	80,00
$U_{10}$ [V]	63333	63333	63333	63333
$P_{10}$ [W]	55556	55556	69444	244444
$Z_{10}$ [ $\Omega$ ]	791,7 $\angle$ -89,37°	793,1 $\angle$ -89,37°	2533,3 $\angle$ -87,49°	791,7 $\angle$ -87,2°
$I_{1k}$ [A]	480,00	470,00	493,75	470,00
$U_{1k}$ [V]	63333	63333	63333	63333
$P_{1k}$ [kW]	3911,11	3744,44	5250,00	4188,89
$Z_{1k}$ [ $\Omega$ ]	131,9 $\angle$ 82,6°	134,8 $\angle$ 82,77°	128,3 $\angle$ 80,33°	134,8 $\angle$ 81,91°
Přípravek	6	7	8	
$I_{10}$ [A]	6,67	22,73	16,67	
$U_{10}$ [V]	63333	129545	129545	
$P_{10}$ [W]	18519	193698	94697	
$Z_{10}$ [ $\Omega$ ]	9495 $\angle$ -87,49°	5699 $\angle$ -86,23°	7771,1 $\angle$ -87,49°	
$I_{1k}$ [A]	630,00	659,09	666,67	
$U_{1k}$ [V]	63333	129545	129545	
$P_{1k}$ [kW]	14703,70	16658,06	16439,39	
$Z_{1k}$ [ $\Omega$ ]	100,5 $\angle$ 68,38°	196,55 $\angle$ 78,75°	194,3 $\angle$ 79,03°	

Z impedancí v Tab. 6-12 byly spočítány Blondelovy konstanty podle rovnic (6-24), (6-25), (6-26) a zapsány do Tab. 6-13.

Tab. 6-13 Tabulka Blondelových konstant se skutečným rezistorem

Přípravek	1	2	3	5
<b>A = D</b>	0,926∠0,57°	0,925∠0,57°	0,976∠0,29°	0,977∠0,79°
<b>B</b>	122,1∠83,17°	124,7∠83,34°	125,2∠80,62°	131,7∠82,7°
<b>C</b>	1,17E-03∠89,94°	1,17E-03∠89,94°	3,85E-04∠87,78°	1,23E-03∠87,99°
Přípravek	6	7	8	
<b>A = D</b>	0,995∠0,12°	0,984∠0,25°	0,988∠0,16°	
<b>B</b>	100,0∠68,5°	193,4∠79°	192∠79,19°	
<b>C</b>	1,05E-04∠87,61°	1,73E-04∠86,48°	1,27E-04∠87,65°	

## 6.2 Návrh Modelu

Mým dalším cílem v bakalářské práci bylo navrhnutí laboratorního modelu podle vlastního uvážení. Nejdříve bylo zvoleno, že laboratorní model bude navrhnout pro napěťovou hladinu 110 kV. Pro model byly vybrány parametry pro venkovní vedení 110 kV, který má vodič z AlFe 450/6 mm<sup>2</sup>. Parametry lana jsou  $R_k = 0,065 \Omega/\text{km}$ ,  $X_k = 0,3854 \Omega/\text{km}$  a  $B_k = 2,982 \mu\text{S}/\text{km}$ . Délka vedení byla zvolena 234,6 km. Parametry modelu jsou uvedeny v Tab. 6-14.

Tab. 6-14 Parametry navrženého modelu

Parametry vedení	
$R_k [\Omega/\text{km}]$	0,065
$X_k [\Omega/\text{km}]$	0,3854
$B_k [\text{S}/\text{km}]$	2,982E-06
$C_k [\text{F}/\text{km}]$	9,49E-09
$l [\text{km}]$	234,6
$R [\Omega]$	15,2
$X [\Omega]$	90,4
$C [\text{F}]$	2,22E-06
$L [\text{H}]$	0,29
$Z [\Omega]$	91,7
$U [\text{V}]$	63509
$I [\text{A}]$	692,6

Poměrná kapacita byla spočítána jako:

$$C_k = \frac{B_k}{2\pi * f} = \frac{2,982 * 10^{-6}}{2\pi * 50} = 9,49 * 10^{-9} \text{ F/km} \quad (6-30)$$

Poté mohly být spočítány parametry modelu

- odpor:

$$R = l * R_k = 234,6 * 0,065 = 15,2 \Omega \quad (6-31)$$

- reaktance:

$$X = l * X_k = 234,6 * 0,3854 = 90,4 \, \Omega \quad (6-32)$$

- kapacita:

$$C = l * C_k = 234,6 * 9,49 * 10^{-9} = 2,22 * 10^{-6} \, F \quad (6-33)$$

- indukčnost:

$$L = \frac{X}{2\pi * f} = \frac{90,4}{2\pi * 50} = 0,29 \, H \quad (6-34)$$

Z reaktance a odporu byla spočítána impedance:

$$Z = \sqrt{X^2 + R^2} = \sqrt{90,4^2 + 15,2^2} = 91,7 \, \Omega \quad (6-35)$$

Nakonec bylo ověřeno, jestli velikost proudu nepřesahuje 700 A:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{63509}{91,7} = 692,6 \, A \quad (6-36)$$

Tab. 6-15 Součástky pro laboratorní model

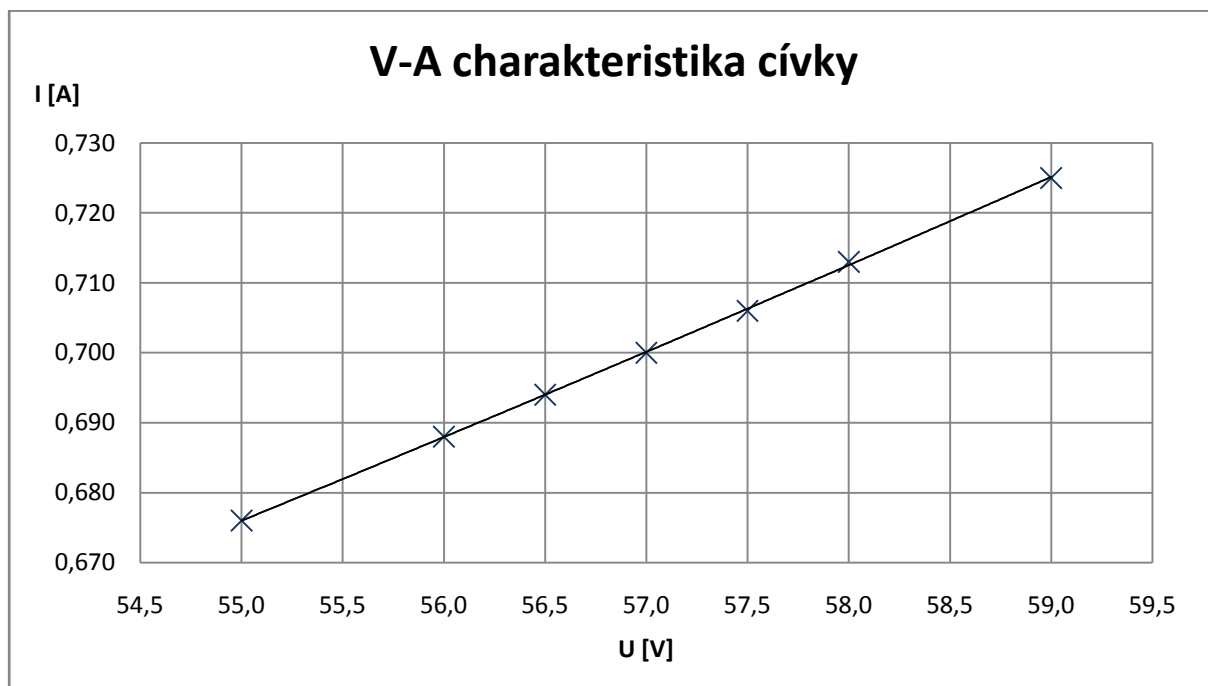
Součástky	Tlumivka	Rezistor	Kondenzátor
Označení	HAMMOND 159ZA	RD 10R 10W	MKS4-1/630V
$U$ [V]	500 DC		630
$I$ [A]	1		
$R$ [ $\Omega$ ]	6	10	
$L$ [H]	0,3		
$C$ [F]			1,00E-06
$P_z$ [W]		10	

Součástky pro laboratorní model byly zvoleny pro nejbližší hodnotu k reálnému prvku. Kondenzátor je poloviční z důvodu, že se v obou příčných větvích použije jeden a jejich kapacita se nakonec sečte.

V Tab. 6-16 je změřena samotná cívka a vypočtená její modelová indukčnost. Z naměřených hodnot byl vytvořen graf Obr. 6-4, který zobrazuje linearitu indukčnosti.

Tab. 6-16 Indukčnost cívky

$U_m$ [V]	$I_m$ [A]	$R_m$ [ $\Omega$ ]	$Z_m$ [ $\Omega$ ]	$X_m$ [ $\Omega$ ]	$L_m$ [H]
55,0	0,676	3	81,36	81,31	0,26
56,0	0,688	3	81,40	81,34	0,26
56,5	0,694	3	81,41	81,36	0,26
57,0	0,700	3	81,43	81,37	0,26
57,5	0,706	3	81,44	81,39	0,26
58,0	0,713	3	81,35	81,29	0,26
59,0	0,725	3	81,38	81,32	0,26



Obr. 6-4 Graf V-A charakteristika cívky

Sestavený model byl změřen v zapojení naprázdno a nakrátko. Naměřené hodnoty byly zapsány do Tab. 6-17.

Tab. 6-17 Parametry modelu

Přípravek	Bez odporu	S odporem
$m_u$	9,00E-04	9,00E-04
$m_i$	1,00E-03	1,00E-03
$I_0$ [mA]	36	40
$U_0$ [V]	57,0	58,1
$P_0$ [mW]	90	100
$I_k$ [mA]	684	680
$U_k$ [V]	57,0	57,7
$P_k$ [W]	1,28	6,52

Pomocí měřitek  $m_u$ ,  $m_i$  a  $m_z$  byly přepočítány naměřené hodnoty z Tab. 6-17 na reálné parametry podle rovnic pro zapojení naprázdno (6-14), (6-15), (6-16) a pro zapojení nakrátko (6-18), (6-19) a (6-20). Z přepočtených hodnot byla poté spočítána impedance naprázdno a nakrátko podle rovnic (6-17) a (6-21). Vypočtené hodnoty byly zapsány do tabulky Tab. 6-18.

Tab. 6-18 Přepočtené hodnoty

Přípravek	Bez odporu	S odporem
$I_{10}$ [A]	36	40
$U_{10}$ [V]	63333	64556
$P_{10}$ [W]	100000	111111
$Z_{10}$ [ $\Omega$ ]	$1759,3 \angle -87,49^\circ$	$1613,9 \angle -87,53^\circ$
$I_{1k}$ [A]	684	680
$U_{1k}$ [V]	63333	64111
$P_{1k}$ [kW]	1422,22	7244,44
$Z_{1k}$ [ $\Omega$ ]	$92,59 \angle 88,12^\circ$	$94,28 \angle 80,43^\circ$

Z impedancí v Tab. 6-18 byly spočítány Blondelovy konstanty podle rovnic (6-24), (6-25), (6-26) a zapsány do Tab. 6-19.

Tab. 6-19 Blondelovy konstanty

Přípravek	Bez odporu	S odporem
<b>A = D</b>	$0,975 \angle 0,11^\circ$	$0,973 \angle 0,33^\circ$
<b>B</b>	$90,28 \angle 88,23^\circ$	$91,73 \angle 80,76^\circ$
<b>C</b>	$5,54\text{E-}04 \angle 87,6^\circ$	$6,03\text{E-}04 \angle 87,86^\circ$

## 7. ZÁVĚR

Vlivem nárůstu odběratelů elektrické energie, stoupají požadavky pro přenos elektrického výkonu. Nárůst výkonu zvyšuje ztráty na vedení a tím se snižuje účinnost přenosu. Proto se staví nové vedení, které ovšem ruší okolí magnetickým polem a zabírá hodně místa. Na snížení ztrát a magnetického pole se stále pracuje a vyvíjí se nové technologie, které zvýší účinnost elektrické sítě.

V bakalářské práci jsem optimalizoval parametry sedmi laboratorních modelů. Po změření jsem k modelům dopočítal přídavný odpor, aby souhlasil s reálnými parametry vedení. Modely jsem upravoval, aby reálný proud nepřesahoval hodnotu 700 A nebo proudovou zatížitelnost reálných vodičů. Délku vedení, aby nepřesahovala hodnotu 430 km a přídavný odpor, aby vycházel do  $12\ \Omega$ , kvůli ztrátovému výkonu reálných prvků, které by zahřívaly modely a časem měnily parametry modelů. Po navrhnutí jsem změřil modely s přídavným odporem nakrátko a naprázdno. Ze změřených hodnot jsem dopočítal Blondelovy konstanty a porovnal jejich hodnoty s hodnotami bez přídavného odporu. Pro modely 1, 2, 3 a 5 vyšly Blondelovy konstanty s drobnými rozdíly. Rozdíly jsou způsobené nestejným nastavením hodnot u měření, zaokrouhlováním při výpočtu a při měření. U modelů 6, 7 a 8 se Blondelovy konstanty mezi sebou liší více. Pro zmenšení rozdílů by pomohlo do obvodu připojit kondenzátor, který by vyhovoval modelu. Přídavné rezistory jsem navrhl tak, aby vydržely náročné měření nezkušených studentů. Rezistory proto mají trojnásobně větší ztrátový výkon, než by měli mít.

Návrh laboratorního modelu jsem provedl pro napětí 110 kV a vybral jsem parametry pro lano 450/6 mm<sup>2</sup>. Délku vedení jsem zvolil 234,6 km. Přepočtené parametry vedení mi vyšly takto: indukčnost  $L = 0,29\ \text{H}$ , rezistivita  $R = 15,2\ \Omega$  a kapacita  $C = 2,22\text{E-}06\ \text{F}$ . Proud vedením bude protékat o velikosti  $I = 692,6\ \text{A}$ . Součástky jsem navrhnul, aby model mohl být napájen ze sítě a odolal běžně se vyskytujícím napětovým špičkám v síti. Ty se v síti vyskytují např. vlivem spínání připojených prvků a zařízení.




## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] YDOR, Maxmilián. *Nikola Tesla - muž, který změnil naše životy* [online]. 2011 [cit. 2015-12-18]. Dostupné z: <http://www.tvfreak.cz/nikola-tesla-muz-ktery-zmenil-nase-zivoty/4487>
- [2] BLAŽEK, Vladimír. *Distribuce elektrické energie*. Brno. Dostupné také z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php?dpid=22240](https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=22240)
- [3] *Rozvodné sítě*. Dostupné také z: <http://jjohnyk.sweb.cz/elektrotechnika/12.htm>
- [4] TOMAN, Petr. *Provoz distribučních soustav* [online]. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011 [cit. 2015-12-17]. ISBN 978-80-01-04935-8. Dostupné z: [http://k315.feld.cvut.cz/CD\\_MPO/CVUT-7-Provoz.pdf](http://k315.feld.cvut.cz/CD_MPO/CVUT-7-Provoz.pdf)
- [5] *Podzemní kabelová elektrická vedení jsou výjimečným řešením* [online]. 2013 [cit. 2015-12-17]. Dostupné z: [http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/podzemni-kabelova-elektricka-vedeni-jsou-vyjimecnym-resenim\\_20896.html](http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/podzemni-kabelova-elektricka-vedeni-jsou-vyjimecnym-resenim_20896.html)
- [6] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. *Rozvodná zařízení* [online]. [cit. 2015-12-17]. Dostupné z: [http://home.zcu.cz/~tesarova/PEC/Soubory/RZ\\_2007.pdf](http://home.zcu.cz/~tesarova/PEC/Soubory/RZ_2007.pdf)
- [7] RICHTER, Miroslav. *Návrh rekonstrukce distribuční sítě v zadané oblasti* [online]. Brno, 2008 [cit. 2015-12-17]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=7354](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=7354). Diplomové práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [8] *Stožáry VVN: Funkční požadavky na stožáry* [online]. [cit. 2015-12-17]. Dostupné z: [https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CCcQFjABahUKEwjph83e4-LIAhWECiwKHaQmDUk&url=https%3A%2F%2Fwww.pslib.cz%2Fpe%2Fskola%2Fstudijni\\_materialy%2Ftechnologie\\_vedeni%2Fstozary.doc&usg=AFQjCNGEnzsPnVm5DyPl-c6xxLxufDkgMQ&sig2=H4pe](https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CCcQFjABahUKEwjph83e4-LIAhWECiwKHaQmDUk&url=https%3A%2F%2Fwww.pslib.cz%2Fpe%2Fskola%2Fstudijni_materialy%2Ftechnologie_vedeni%2Fstozary.doc&usg=AFQjCNGEnzsPnVm5DyPl-c6xxLxufDkgMQ&sig2=H4pe)
- [9] *TenneT to undertake demonstration project for innovative 'super cable'* [online]. 10 September 2015. [cit. 2015-12-17]. Dostupné z: <http://www.tennet.eu/nl/en/news/article/tennet-to-undertake-demonstration-project-for-innovative-super-cable.html>
- [10] *PŘENOS ELEKTRICKÉ ENERGIE BUDOUCNOSTI* [online]. [cit. 2015-12-17]. Dostupné z: [http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/05/prenos\\_3.html](http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/05/prenos_3.html)
- [11] *Rio Madeira: nejdelší HVDC přenosové spojení na světě jde do finále* [online]. 2013 [cit. 2015-12-17]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/vyroba-a-prenos/12.php>
- [12] MOLEK, Tomáš. *V Nizozemsku postaví nejdelší supravodivé vedení VN* [online]. 2015 [cit. 2015-12-17]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/v-nizozemsku-postavi-nejdelsi-supravodive-vedeni-vn/>
- [13] LANDGRAF, Monika. *Operation of longest superconducting cable worldwide started* [online]. May12,2014 [cit. 2015-12-17]. Dostupné z: <http://phys.org/news/2014-05-longest-superconducting-cable-worldwide.html>
- [14] *HVDC Control System* [online]., 16 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: [http://www.sari-energy.org/PageFiles/What\\_We\\_Do/activities/HVDC\\_Training/Materials/1JNL100020-842%20-%20PDF%20-%20Rev.%2000.PDF](http://www.sari-energy.org/PageFiles/What_We_Do/activities/HVDC_Training/Materials/1JNL100020-842%20-%20PDF%20-%20Rev.%2000.PDF)

- [15] MIČKA, Dominik. *MODEL HVDC SPOJKY PRO LABORATORNÍ VÝUKU* [online]. Brno, 2013 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=68049](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=68049)
- [16] Jinping - Sunan: The most powerful transmission line in the world. *ABB* [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://new.abb.com/systems/hvdc/references/jinping---sunan>
- [17] Rio Madeira: The longest transmission link in the world - 2,375 kilometers. *ABB* [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://new.abb.com/systems/hvdc/references/rio-madeira>
- [18] NorNed: The 580 kilometer-long NorNed link is the longest subsea high-voltage cable in the world. *ABB* [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://new.abb.com/systems/hvdc/references/norned>
- [19] World's Highest HVDC Line Delivers Power to Tibet. *INMR* [online]. 2015, **22**, 5 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.inmr.com/worlds-highest-hvdc-line-delivers-power-totibet/>
- [20] *History of Superconductors* [online]. Ankara University Rectorate [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://cesur.en.ankara.edu.tr/history-of-superconductors/>
- [21] The Nobel Prize in Physics 1987. *Nobelprize.org* [online]. 2014 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1987/press.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1987/press.html)
- [22] CARTLIDGE, Edwin. Superconductivity record sparks wave of follow-up physics. *Nature News* [online]. Nature Publishing Group, 2015 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.nature.com/news/superconductivity-record-sparks-wave-of-follow-up-physics-1.18191#/related-links>
- [23] SUPERCONDUCTING CABLE SYSTEMS. *Nexans* [online]. , 8 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: [http://www.nexans.de/eservice/Germany-de\\_DE/fileLibrary/Download\\_540144810/Germany/files/Nexans\\_Superconducting\\_cable\\_systems.pdf](http://www.nexans.de/eservice/Germany-de_DE/fileLibrary/Download_540144810/Germany/files/Nexans_Superconducting_cable_systems.pdf)
- [24] Furukawa Electric Develops the World's Highest Standard for High-Temperature Superconducting Cables. *Furukawa Electric* [online]. 2013 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: [https://www.furukawa.co.jp/english/what/2013/kenkai\\_130129.htm](https://www.furukawa.co.jp/english/what/2013/kenkai_130129.htm)
- [25] *MAGLEV: The flying train* [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.supraconductivite.fr/en/index.php?p=applications-trains-maglev-more>
- [26] Superconductivity. *Science Learning Hub* [online]. 2010 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://sciencelearn.org.nz/Contexts/Ceramics/Looking-Closer/Superconductivity>
- [27] *Jinping-Sunan ±800kV UHVDC Transmission Line Project* [online]. Energy China, 2015 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: [http://en.ceec.net.cn/art/2015/1/8/art\\_149\\_288690.html](http://en.ceec.net.cn/art/2015/1/8/art_149_288690.html)
- [28] NEJEDLÝ, Petr. Supersíť pro budoucí větrné elektrárny v Evropě? *Blog.iDNES.cz* [online]. Praha: MAFRA, a. s., 2010 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://nejedly.blog.idnes.cz/blog.aspx?c=123599>
- [29] *ELEKTRICKÉ VEDENIA* [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: [http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/elektroenergetika1/ELEN2007/EENERGETIKA/ELEN-5\\_2.htm](http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/elektroenergetika1/ELEN2007/EENERGETIKA/ELEN-5_2.htm)
- [30] *Parametry vedení a transformátorů* [online]. [cit. 2016-06-25]. Dostupné z: [https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwih8t6H6cLNAhUEmBoKHTtAY0QFggdMAA&url=http%3A%2F%2Ffei1.vsb.cz%2Fkat410%2Fstudium%2Fstudijni\\_materialy%2Fres%2Fparametry.doc&usq=AFQjCNE7UjM96vT0PKezFYeuDRhF8BuPag&sig2=DyclOAR41EPjhc5EHtMJTw](https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwih8t6H6cLNAhUEmBoKHTtAY0QFggdMAA&url=http%3A%2F%2Ffei1.vsb.cz%2Fkat410%2Fstudium%2Fstudijni_materialy%2Fres%2Fparametry.doc&usq=AFQjCNE7UjM96vT0PKezFYeuDRhF8BuPag&sig2=DyclOAR41EPjhc5EHtMJTw)

## 8. PŘÍLOHY

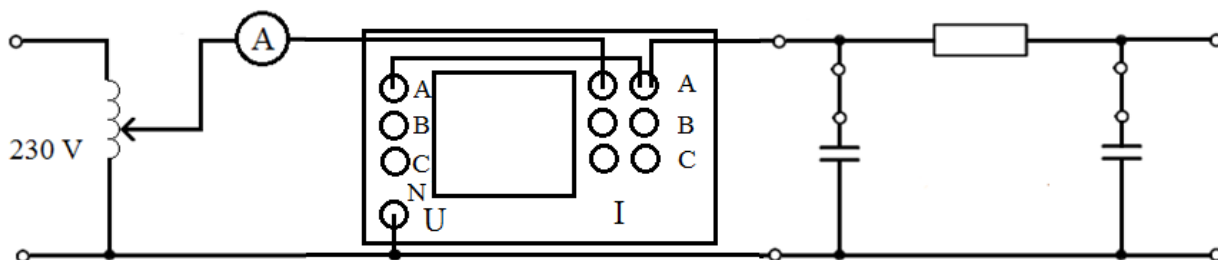
Příloha A - Stanovení blondelových konstant vedení, pomocí měření vedení na prázdko a nakrátko

 <b>FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ</b>	Jméno:	
	Spolupracoval (i):	
Název úlohy:	Ročník:	Skupina:
	Měřeno dne:	Odevzdáno dne:
	Číslo úlohy:	Hodnocení:

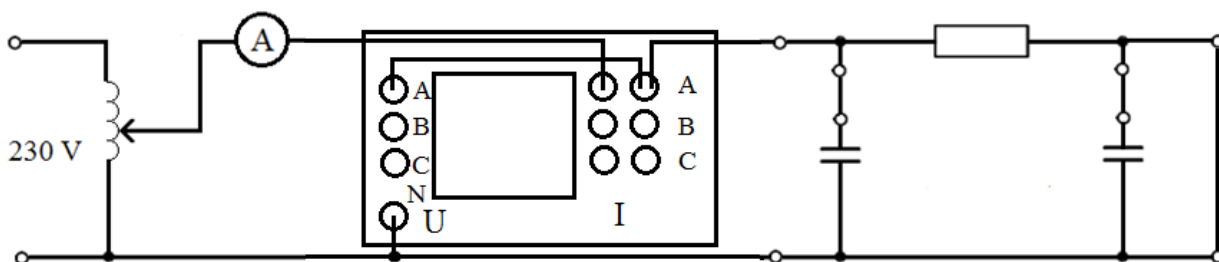
### 1) Zadání:

- Změřte vstupní napětí, proud a činný výkon na vedení ve stavu naprázdno.
- Změřte vstupní napětí, proud a činný výkon na vedení ve stavu nakrátko.
- Vypočítejte impedanci naprázdno a nakrátko.
- Stanovte Blondelovy konstanty.

### 2) Schéma zapojení měření naprázdno a nakrátko



Obr. 8-1 Schéma  $\pi$ -článku v zapojení naprázdno



Obr. 8-2 Schéma  $\pi$ -článku v zapojení nakrátko

## 3) Postup měření:

- Zapojíme obvod s vedením naprázdno. Nastavíme napětí, odečteme hodnoty  $U_0$ ,  $I_0$  a  $P_0$ .
- Zapojíme obvod s vedením nakrátko. Nastavíme napětí, odečteme hodnoty  $U_k$ ,  $I_k$  a  $P_k$ .
- Změřené hodnoty přepočteme pomocí měřitek modelu na  $U_{I0}$ ,  $I_{I0}$  a  $P_{I0}$ . Z nich pak vypočítáme velikost impedance  $Z_{I0}$ .
- Změřené hodnoty přepočteme pomocí měřitek modelu na  $U_{Ik}$ ,  $I_{Ik}$  a  $P_{Ik}$ . Z nich pak vypočítáme velikost impedance  $Z_{Ik}$ .
- Z impedancí  $Z_{I0}$  a  $Z_{Ik}$  vypočteme Blondelovy konstanty  $A$ ,  $B$  a  $C$ .

## 4) Výpočet jednotlivých veličin

$$I_{10} = \frac{I_0}{m_i} \quad (8-1)$$

$$U_{10} = \frac{U_0}{m_u} \quad (8-2)$$

$$P_{10} = \frac{P_0}{m_p} \quad (8-3)$$

$$\bar{Z}_{10} = \frac{U_{10}}{I_{10}} \angle -\arccos \frac{P_{10}}{U_{10} * I_{10}} \quad (8-4)$$

$$I_{1k} = \frac{I_k}{m_i} \quad (8-5)$$

$$U_{1k} = \frac{U_k}{m_u} \quad (8-6)$$

$$P_{1k} = \frac{P_k}{m_p} \quad (8-7)$$

$$\bar{Z}_{1k} = \frac{U_{1k}}{I_{1k}} \angle \arccos \frac{P_{1k}}{U_{1k} * I_{1k}} \quad (8-8)$$

$$\bar{A} = \bar{D} = \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{\bar{Z}_{1k}}{\bar{Z}_{10}}}} \quad (8-9)$$

$$\bar{B} = \bar{A} * \bar{Z}_{1k} \quad (8-10)$$

$$\bar{C} = \frac{\bar{A}}{\bar{Z}_{10}} \quad (8-11)$$

## 5) Použité přístroje

Označení přístroje	Typ přístroje	Rozsah	Evidenční číslo	Třída přesnosti

#### 6) Závěr

Závěr bude psán srozumitelně a jasně. Bude rozepsaný problém, řešení a výsledky z měření. Závěr bude psán každým zvlášť a nebude se navzájem kopírovat. Názorová shoda měřícího týmu není považována za opis. Dále se vyvarujte hodnocení, které nehodnotí úlohu.